

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy - 342

Návrh umístění zadního přitlačného křídla na závodním vozidle

Design of Rear Wing Location on Racing Vehicle

Student: Kevin Fojtů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Dresler

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **Kevin Fojtů**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie
Téma: **Návrh umístění zadního přitlačného křídla na závodním vozidle**
Design of Rear Wing Location on Racing Vehicle
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor řešené problematiky
3. Návrh metodiky výpočtu aerodynamických vlastností
4. Příprava 3D dat
5. Volba vhodného umístění přitlačného křídla na vozidle
6. Zhodnocení a doporučení
7. Závěr

Cílem práce je najít vhodné umístění zadního přitlačného křídla závodního automobilu tak, aby byla zajištěna co nejlepší aerodynamická efektivita prvku generujícího přítlak.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. 4th ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 978-0768000290.
2. DRÁBKOVÁ, Sylva. Mechanika tekutin [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN isbn978-80-248-1508-4.
3. User Guide Manual for Software Star CCM+

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Dresler**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

aleš K

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



[Handwritten signature]

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo –bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Kevin Fojtů

Adresa trvalého pobytu autora práce: Jurije Gagarina 1487/27, Havířov, 736 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

FOJTŮ, K. *Návrh umístění zadního přitlačného křídla na závodním vozidle*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2018, Bakalářská práce, 78 s. Vedoucí práce: Dresler, P.

Bakalářská práce se zabývá návrhem a výpočtem přitlačného křídla. Úvodní část práce se věnuje základním teoretickým pojmům z oblasti aerodynamiky. V další části práce byla navržena metodika výpočtu, včetně tvorby 3D dat. Závěrečná část práce obsahuje hodnocení a srovnání jednotlivých profilů, výpočet vybraného profilu spolu s vozidlem a následný návrh jeho umístění.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

FOJTŮ, K. *Design of Rear Wing Location on Racing Vehicle*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transportation, 2018, Bachelor Thesis, 78 p. Thesis head: Dresler. P.

This bachelor thesis describes the design and calculation of a rear wing. The introductory part comprises of basic theoretical concepts of aerodynamics. The next part contains the calculation methodology including the creation of 3D data. The final part of the thesis consists of evaluation a comparison of individual profiles, calculation of the selected profile together with the vehicle and the subsequent desing of its placement.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Pavlovi Dreslerovi za pomoc, cenné rady a vedení při tvorbě bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Jiřímu Sklenáři za odborné rady v oblasti aerodynamiky přitlačných křídel.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	10
1 Úvod.....	12
1.1 Historie aerodynamiky silničních vozidel.....	13
2 Teoretický rozbor řešené problematiky	14
2.1 Úvod do mechaniky tekutin	14
2.2 Pojmy vztahující se k aerodynamice vozidel	16
2.3 Mechanika pohybu silničních vozidel.....	21
2.4 Obtékání profilů	24
3 Návrh metodiky výpočtu aerodynamických vlastností.....	29
3.1 Příprava a sběr nutných podkladů	29
3.2 Tvorba geometrie profilu	29
3.3 Definice výpočetní oblasti.....	30
3.4 Import geometrie a definice výpočetní sítě.....	30
3.5 Definice okrajových podmínek a nastavení výpočtu	31
3.6 Metody analýzy výsledků	35
4 Příprava 3D dat	36
4.1 Tvorba 3D modelu vozidla.....	36
4.2 Tvorba 3D modelů profilů	36
4.3 Kontrola geometrie 3D.....	37
4.4 Příprava modelů k využití v aerodynamických výpočtech	38
4.5 Tvorba výpočetního modelu dle definované metodiky.....	39
4.6 Analýza vybraných profilů a jejich základní charakteristiky.....	41
5 Volba vhodného umístění přitlačného křídla na vozidle	57
6 Zhodnocení a doporučení.....	63
7 Závěr	66
8 Seznam použitých zdrojů.....	67
Seznam obrázků.....	69

Seznam tabulek	70
Seznam grafů	70
Seznam příloh	71
A Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu NACA 63(2)-615	72
B Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu Be 153-055	73
C Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu Be 122-185	74
D Příloha – Tabulky hodnot simulace vozidla a profilu při posunu v ose x	75
E Příloha – Tabulky hodnot simulace vozidla a profilu při posunu v ose y	76
F Příloha – Detail tlakového a rychlostního pole za vozidlem	77
G Příloha – Proudnice kolem vozidla s přitlačným křídlem	78

Seznam zkratek a symbolů

CAD	(Computer-aided design) - počítačem podporované navrhování	
CFD	(Computational fluid dynamics) - výpočetní metoda proudění kapalin a plynů	
DNS	Direct Numerical Simulation	
LES	Large Eddy Simulation	
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes	
a	zrychlení	$[m.s^{-2}]$
A _F	Aerodynamická efektivita	[-]
c _x	Koeficient odporu vzduchu	[-]
c _D	Koeficient odporu vzduchu (coefficient of drag)	[-]
c _L	Koeficient vztlaku (coefficient of lift)	[-]
f	součinitel odporu valení	[-]
F _k	Hnací síla na kole	[N]
F _x	Hnací síla vozidla	[N]
F _{yp}	Síla působící na přední nápravu	[N]
F _{yz}	Síla působící na zadní nápravu	[N]
g	Gravitační zrychlení	$[m.s^{-2}]$
G _v	Tíha vozidla	[N]
h	Výška hladiny	[m]
i _{PÚ}	Převodový poměr převodného ústrojí	[-]
l	Charakteristický rozměr průtočného profilu	[m]
M _K	Hnací moment na kole	[N.m]
M _{SM}	Moment spalovacího motoru	[N.m]
O _F	odpor valení	[N]
O _s	Odpor sklonu	[N]
O _T	Odpor tahu přípojného vozidla	[N]
O _v	Odpor vzduchu	[N]
O _z	Odpor ze zrychlení	[N]
p	Tlak	[Pa]
Q _v	Hmotnostní průtok	$[kg.s^{-1}]$
R	Univerzální plynová konstanta	[-]
r	Poloměr kola	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S	Průřez trubice	$[m^2]$

s	Sklon vozovky	[%]
S_x	Čelní plocha	[m ²]
T	Teplota plynu	[K]
v	Rychlost	[m.s ⁻¹]
V	Objem	[m ³]
v_n	Náporová rychlost	[m.s ⁻¹]
v_v	Rychlost větru	[m.s ⁻¹]
α	Úhel sklonu roviny	[°]
δ	Součinitel vlivu rotujících částí	[-]
η	Dynamická viskozita	[Pa]
$\eta_{PÚ}$	Účinnost převodného ústrojí	[-]
ν	Kinematická viskozita proudící kapaliny	[m ⁻² .s ⁻¹]
τ	Viskozita	[Pa]

1 Úvod

Aerodynamika je věda zabývající se pohybem plynu kolem tělesa. Největší vliv má v leteckém a automobilovém průmyslu. Aerodynamické měření je nutnou součástí při konstruování automobilů. Hraje důležitou roli u automobilů ve spotřebě paliva, maximální rychlosti, hromadění vody na čelním skle při dešti, chlazení tlumičů a brzd, stabilitě vozidla, ovladatelnosti vozidla, řiditelnosti generace přítlaku, redukci hluku způsobené jízdou vozidla a mnoho dalších případů. Pro běžná vozidla je jednou z nejvíce řešených problematik spotřeba paliva, kterou se snažíme, co nejvíce snížit. Spotřeba paliva jde částečně snížit díky aerodynamice.

Aerodynamická analýza probíhá v aerodynamickém tunelu při použití konkrétního vozidla nebo jeho modelu. Nejpřesnějších výsledků dosáhneme při použití daného vozidla s otáčejícími koly. Výsledkem měření je hodnota koeficientu odporu vzduchu, rychlost proudění vzduchu kolem karoserie, působení tlaku na karoserii a další.

Aerodynamika je jedním z důležitých prvků závodních vozidel, ovlivňující jeho maximální rychlost, ovladatelnost, stabilitu. Závisí na ní rychlejší průjezd zatáčkou, přilnavost při akceleraci, čas na jedno kolo. Hlavní částí aerodynamického balení automobilu jsou např. zadní přítlaková křídla. Při návrhu vybíráme jeho tvar, a také umístění. Výběr a umístění křídla je úkol, kterým se v této bakalářské práci budu zabývat.

1.1 Historie aerodynamiky silničních vozidel

Historicky se aerodynamika začala řešit počátkem 20. století, kdy byly použity tvary karoserií vycházející z přírody, např. tvar padající kapky. Přírodou byly odjakživa inspirování designéři v leteckém průmyslu, ale také i ve stavebnictví. První auto považované za aerodynamické je z roku 1921. Jedná se o auto Tropfenwagen navržené Edmundem Rumplerem. U posledního zachovaného kusu byla změřena hodnota aerodynamického odporu $c_x=0,28$, která je obdobná hodnotám současných sériově vyráběných automobilů.



Obr. 1 – Automobil Tropfenwagen [2]

Největší rozmach ve vývoji aerodynamiky závodních i sériových automobilů způsobily poznatky ze závodů Formule. Vývoj aerodynamického paketu závodních vozidel je nezbytný pro bezpečnost, a také zlepšení časů na jedno kolo. V 80. letech minulého století se začal tvar aerodynamického paketu podobat dnešnímu. Současné aerodynamické pakety závodních vozidel Formule dosahují hodnoty součinitele aerodynamického odporu až 1,5.

2 Teoretický rozbor řešené problematiky

V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé základní pojmy, kterým je nutno z hlediska aerodynamiky porozumět. Součástí znalostí aerodynamiky je nutné pochopit základy mechaniky tekutin, které jsou popsány jako první. Poté následují základy mechaniky pohybu vozidel a obtékání těles.

2.1 Úvod do mechaniky tekutin

Aerodynamika je podoborem mechaniky tekutin, tudíž je nutná znalost některých základních pojmů jako jsou: viskozita, zákon zachování hmotnosti, Bernoulliho rovnice, stavová rovnice, Reynoldsovo číslo.

2.1.1 Viskozita

Vzniká při pohybu plynu, kdy dvě sousední vrstvy s různými rychlostmi se pohybují. Na jejich rozmezí se vytváří smykové napětí bránící pohybu, které je způsobováno vnitřním třením (viskozitou tekutiny). Jednoduše řečeno, viskozita je míra tření mezi dvěma sousedními vrstvami proudícího plynu.

Rovnice viskozity [5]:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

Kde:

- $\tau \dots$ Viskozita
- $\eta \dots$ Dynamická viskozita
- $\frac{dv}{dy} \dots$ Gradient rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu

2.1.2 Zákon zachování hmotnosti

Rozdíl mezi vstupující hmotností do kontrolního objemu a vystupující hmotností z kontrolního objemu je roven hmotnosti akumulující v kontrolním objemu.

Platí [5]:

$$Q_v = v \cdot S = konst \quad (2)$$

Kde:

- $Q_v \dots$ Hmotnostní průtok
- $v \dots$ Rychlost
- $S \dots$ Průřez trubice

2.1.3 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice nám vyjadřuje součet kinetické energie, tlakové energie a polohové energie, což je celková mechanická energie hmotnostní jednotky. Ve všech průřezech proudové trubice je tento součet energií konstantní.

Platí [5]:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gh = konst \quad (3)$$

Kde:

- p ... tlak
- ρ ... hustota
- g ... gravitační zrychlení
- h ... výška hladiny

2.1.4 Stavová rovnice plynů

Stavová rovnice plynů popisuje vzájemný stav mezi stavovými veličinami. Pomocí ní se pak vyjadřují jednotlivé veličiny v průběhu termodynamických dějů.

Platí [9]:

$$p \cdot V = R \cdot T \quad (4)$$

Kde:

- V ... objem plynu
- R ... univerzální plynová konstanta
- T ... teplota plynu

2.1.5 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo určuje rozmezí mezi laminárním a turbulentním prouděním. Hodnota rozmezí je udávána jako Reynoldsovo kritické číslo Re_{krit} , jeho hodnota je 2320.

Rovnice pro výpočet Reynoldsova čísla [5]:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (5)$$

Kde:

- Re... Reynoldsovo číslo
- l ... Charakteristický rozměr průtočného profilu
- ν ... Kinematická viskozita proudící kapaliny

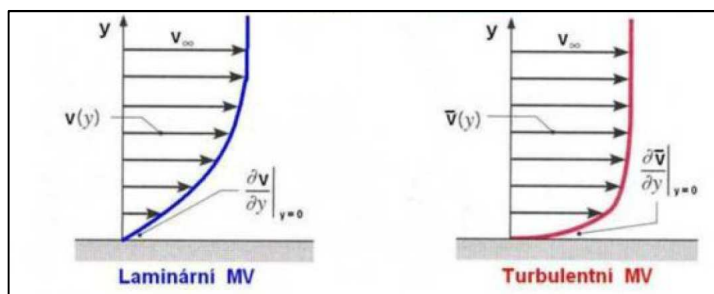
2.2 Pojmy vztahující se k aerodynamice vozidel

V aerodynamice se setkáváme s řadou odborných a důležitých pojmů, které je nutné si objasnit. Následující pojmy jsou těmi nejdůležitějšími k porozumění problematice proudění, silovému a tlakovému působení obtékajícího plynu na těleso.

2.2.1 Mezní vrstva a její odtržení

Mezní vrstva vzniká na povrchu každého obtékaného tělesa. Je to oblast nejbližší k obtékanému tělesu, na kterou má vliv viskozita vzduchu. Na povrchu tělesa je rychlost proudění rovna nule, ale s rostoucí normálovou vzdáleností od povrchu tělesa se mění. Se vznikající odporovou silou je spojen tzv. rychlostní gradient, vznikající třením různě rychlých vrstev obtékající látky, kdy vzniká třením teplo, ovlivňující pohyb tělesa. Změny mezní vrstvy v závislosti na směru tělesa, mění se její tloušťka a neuspořádanost proudění, se dělí na:

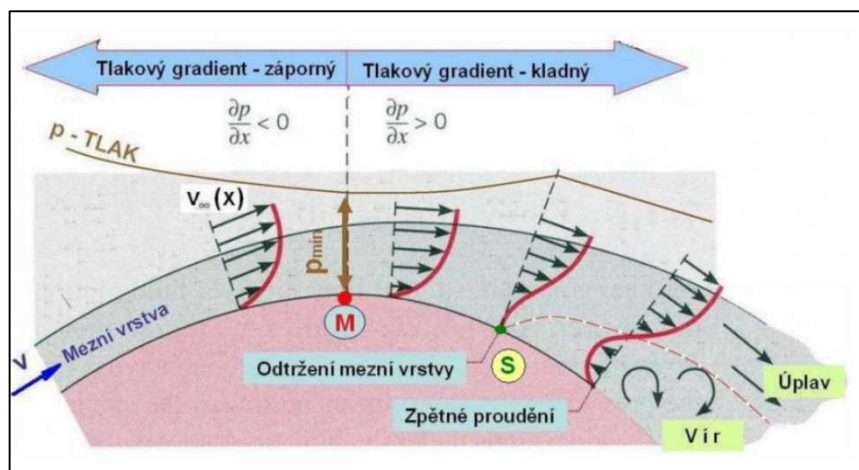
- **Laminární** – Zanedbatelná výměna energie mezi vrstvami, malá vzdálenost mezi vrstvami, kluz vrstev po sobě.
- **Turbulentní** – Velké výměny energie mezi vrstvami, náhodný pohyb obtékající látky.



Obr. 2 – Mezní vrstva [7]

Během obtékání zaoblených těles dochází ke změně rychlosti na povrchu tělesa a mění se tlak. V oblasti rostoucího tlaku jsou částice tekutiny přibírávány vnitřním třením i větším tlakem, který na ně působí. Rychlost v mezní vrstvě klesá až k nule. V bodě S se částice tekutiny zastaví a dochází k odtržení mezní vrstvy. V důsledku účinku kladného tlaku je proud u stěny směřován proti směru proudění. Promícháním se základním proudem dochází ke vzdálení pohybující se částice od stěny. Od bodu S je tím mezní vrstva rozdělována od tělesa a vzniká úplav. O místě odtržení rozhoduje tlakový gradient. Mezní vrstva se nikdy neodtrhne, při obtékání zakřivené stěny, v její první části tzn. náběžné ploše.

[7]

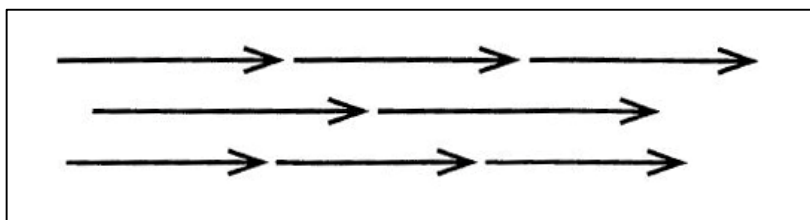


Obr. 3 – Odtržení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [7]

2.2.2 Proudnice, přilnuté a odtržené proudění, úplav

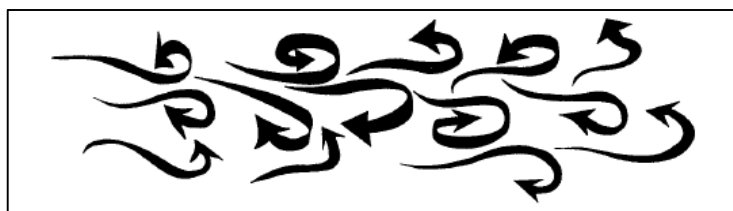
Proudnice je dráha zvolené částice látky, která obtéká kolem tělesa. Vážeme je do tzv. proudového svazku. Proudění lze rozdělit podle tvaru proudnice. Dělíme je tedy na:

- **Laminární neboli ustálené proudění** – Dráhy proudnice se nekříží tzn. jsou rovnoběžné, částice se pohybují přímo a nerotují.



Obr. 4 – Laminární proudnice [6]

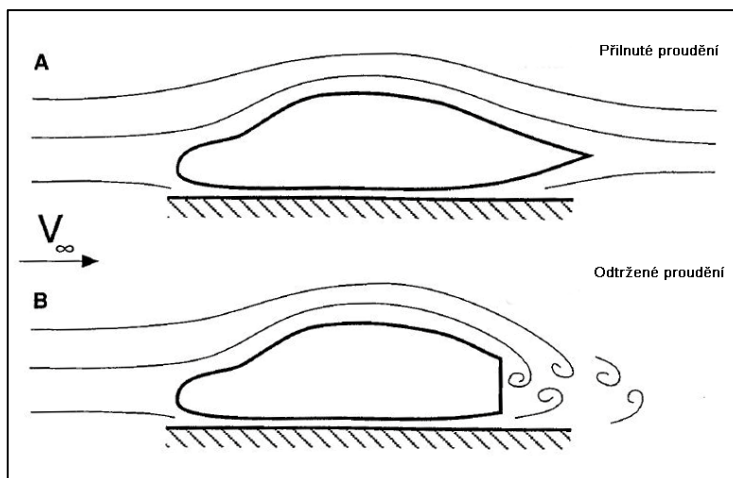
- **Turbulentní neboli vířivé proudění** – Dochází ke vzájemnému promíchávání dráhy proudnice. Rychlosti částic v jednotlivých místech proudění je různá tzv. nestacionární. K turbulentnímu proudění dochází při dosažení kritického Reynoldsova čísla.



Obr. 5 – Turbulentní proudnice [6]

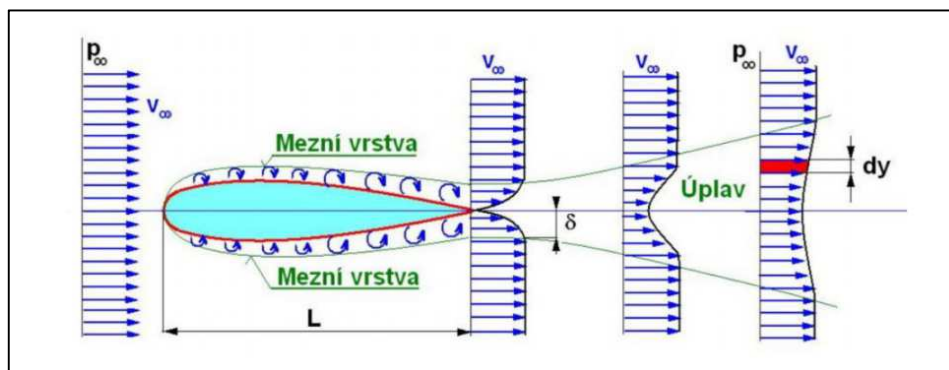
Přilnuté a odtržené proudění je vztaženo k tvaru obtékaného tělesa. Přilnuté proudění, je pro aerodynamiku nesmírně důležité, ovlivňuje nám velikost aerodynamického odporu

nebo zvyšuje přítlak. Proudnicе přilnutého proudění jsou přilehlé k pevnému povrchu a svým pohybem kopírují tvar obtékaného tělesa. Naopak tomu je u odtrženého proudění, kde jeho proudnicе neobkreslují tvar daného povrchu. U vozidel se toto nejčastěji odehrává v zadní části vozidla, kde dochází k odtržení mezní vrstvy.



Obr. 6 – Přilnuté a odtržené proudění [6]

Úplav je oblast zvířeného proudění za obtékaným tělesem tvořená z částic mezních vrstev z povrchu tělesa, popř. z částic odtrženého proudu. K odtržení mezní vrstvy u turbulentního proudění dojde později nežli u laminárního proudění. U turbulentního proudění se přivádí do mezní vrstvy více energie tzn. ztrácí kinetickou energii pomaleji, díky tomu se velikost úplavu zmenšuje a zvětšuje se součinitel odporu c_x . [7]



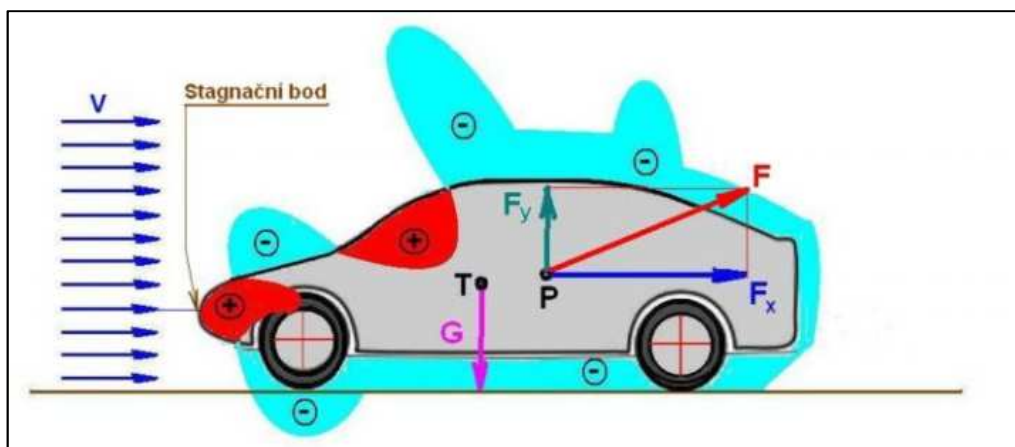
Obr. 7 – Úplav [7]

2.2.3 Tlakové pole

Tlakové pole zobrazuje nerovnoměrné rozložení tlaků působících na karoserii vozidla, které vznikají v důsledku stlačení obtékajícího vzduchu. Největších tlaků dosahujeme ve stagnačním bodě na přídi vozidla a na čelním skle.

Aerodynamický tlak rozdělujeme:

- **Statický tlak** – Měření probíhá v blízkosti stěny, kde rychlost proudění je nulová.
- **Dynamický tlak** – Měříme jej při pohybu vzduchu a závisí na rychlosti proudění.
- **Celkový tlak** – Je vyjádřen jako součet statického a dynamického tlaku.



Obr. 8 – Rozložení tlaku na povrchu karoserie [7]

2.2.4 Vznik vztlakové a odporové síly

Vztlaková síla

Působí v kladném směru osy y a ovlivňuje stabilitu vozidla během jízdy, protože proudění pod vozidlem je charakteru turbulentního, kvůli členité skladbě podvozku. Je zde menší rychlost proudění zapříčiňující vyšší tlak pod vozidlem.

Odporová síla

Odporová síla vzniká při průniku vozidla vzduchem, atmosférou. Její působiště je proti pohybu vozidla v ose x . Hodnota odporové síly se odvíjí od tvaru automobilu, a také značně ovlivňujícím faktorem je velikost čelní plochy S_x .

Přítlačná síla

Její směr je opačný od vztlakové síly. Přítlak oproti vztlakové síle, působí příznivě na vozidlo, především způsobuje větší zatížení na pneumatiky, tím zvyšuje přilnavost, zlepšuje akceleraci, celkově kladně ovlivňuje vlastnosti vozidla během jízdy. Vzniká jako rozdíl tlaku působícího na horní část vozidla a spodní část, hodnota tlaku na horní části vozidla je vyšší.

Čelní plocha S_x

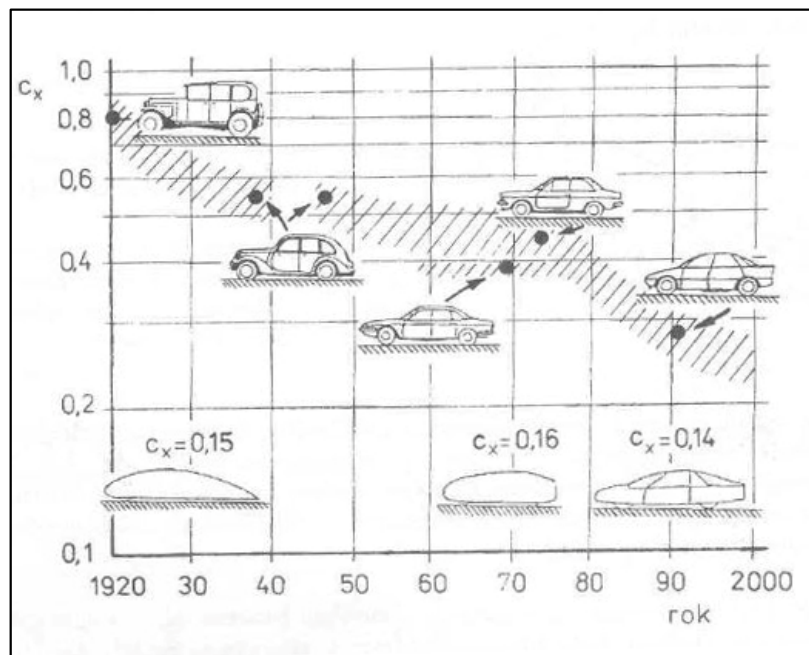
Čelní plochu získáme pravoúhlým průmětem vozidla do roviny kolmé na osu x . Základem je, že čím je menší tato plocha, tím je menší i odpor vzduchu.



Obr. 9 – Projekce čelní plochy [10]

Koeficient odporu c_x

Určuje kvalitu řešení aerodynamického tvaru vozidla. Jeho hodnotu zjišťujeme v aerodynamickém tunelu. Jeho velikost je shodná jak pro malý přesný model, tak i pro skutečný vůz. Jeho nízká hodnota ovlivňuje spotřebu vozidla, dynamické vlastnosti a další.



Obr. 10 – Vývoj součinitele c_x [10]

Náporová rychlost v_n

Náporovou rychlost získáme součtem dvou částí, ze kterých je složena, a to z rychlosti vozidla a rychlosti větru. Pokud je rychlost větru nulová, tak počítáme jen s rychlostí vozidla.

Platí [10]:

$$v_n = v + v_v \quad (6)$$

Kde:

$v_n \dots$ Náporová rychlost

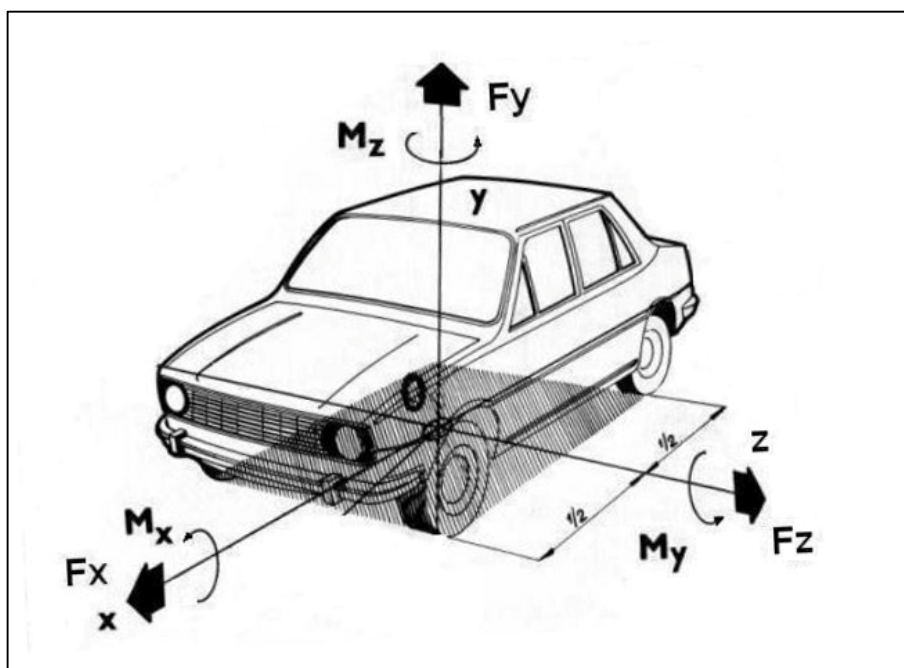
$v_v \dots$ Rychlost větru

2.2.5 Aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo

Na vozidlo působí v osách jednotlivé druhy sil a momentů. Některé síly jsou doprovázeny jinými silami, např. odpor je doprovázen vztlakem. V ose z se nachází klopivý moment a pokud na vozidlo působí boční vítr, tak na vozidlo účinkují boční síly, také v této ose. Dále v ose x působí klopný moment a v ose y stáčivý moment. Tyto tři síly a momenty nám určují vektor celkové síly působící na vozidlo.

Osový souřadný systém vozidla

Souřadný systém využívaný u vozidel, se v některých případech liší od ostatních, protože jsme zvyklí, že v prostoru využíváme pro výšku osu z. U vozidel je výška udávána v ose y, v příčném směru máme osu z a v podélném směru je osa x.



Obr. 11 – Osový souřadný systém vozidla a momenty působící v daných osách [8]

2.3 Mechanika pohybu silničních vozidel

V této kapitole se budu věnovat popisu jednotlivých odporů, které vůz musí při svém pohybu překonávat, a rovnováhou sil v osách x a y.

2.3.1 Jízdní odpory silničního vozidla

Odpory jsou síly působící proti pohybu vozidla. patří mezi ně odpor sklonu, odpor valení odpor ze zrychlení a pro tuto práci nejdůležitější odpor vzduchu.

Odpor sklonu

Vychází ze silového působení na těleso na nakloněné rovině. Vozidlu pohybujícímu se po nakloněné rovině se tíha vozidla G_v rozkládá do dvou složek F_x a F_y .

Rovnice odporu sklonu [10]:

$$O_S = G_v \cdot s \cdot 10^{-2} \quad (7)$$

Kde:

- O_S ... Odpor sklonu
- G_v ... Tíha vozidla
- s ... Sklon vozovky

Odpor valení

Vzniká jako důsledek deformace pneumatiky při styku s podložkou. Odpor valení je ovlivněn hmotností vozidla, sklonem vozovky a materiálem vozovky. Materiál vozovky je určen jako součinitel odporu valení f .

Rovnice Odporu valení [10]:

$$O_F = G_v \cdot \cos \alpha \cdot f \quad (8)$$

Kde:

- O_F ... Odpor valení
- α ... Úhel sklonu roviny
- f ... Součinitel odporu valení

Odpor ze zrychlení

Je tvořen setrvačnými silami vznikajícími při změně rychlosti.

Rovnice odporu ze zrychlení [10]:

$$O_Z = \delta \cdot m_v \cdot a \quad (9)$$

Kde:

- O_Z ... Odpor ze zrychlení
- δ ... součinitel vlivu rotujících částí
- a ... zrychlení

Odpor vzduchu

Odpovídá výslednici tlaků a třecích sil působících na povrch karoserie a její okolí. Ovlivňující faktory jsou vlastnosti prostředí, vozidlový tvar, povrch a rychlost. Vlastnosti vozidla udáváme pomocí tvarového součinitele c_x a čelní plochy S_x .

Rovnice odporu vzduchu [10]:

$$O_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_n^2 \cdot c_x \cdot S_x \quad (10)$$

Kde:

- O_V ... Odpor vzduchu
- v_n ... Náporová rychlost
- c_x ... Součinitel odporu vzduchu
- S_x ... Čelní plocha

2.3.2 Rovnováha sil v ose x a y

Jedná se o složky statického zatížení vozidla, které působí v ose x a y. Rovnováhu sil v ose x značíme F_x a jedná se o hnací sílu v podélném směru vozidla. Sílu F_x získáme jako sumu všech odporů působících na vozidlo. Sílu v ose y značíme F_y , kterou dělíme na dvě složky, sílu působící na přední a zadní nápravu. Součtem těchto dvou složek dostaneme sílu rovnou tíze vozidla.

Rovnice rovnováhy sil [10]:

$$F_x = O_F + O_V + O_S + O_Z + O_T \quad (11)$$

$$F_{yP} + F_{yZ} - G_v = 0 \quad (12)$$

Kde:

- F_x ... Hnací síla vozidla
- O_T ... Odpor tahu přípojného vozidla
- F_{yP} ... Síla působící na přední nápravu
- F_{yZ} ... Síla působící na zadní nápravu

2.3.3 Hnací síla a hnací moment na kole

Zdrojem hnací síly je vozidlový motor, charakterizován kroutícím momentem na výstupu hřídele M_{SM} a otáčkami n_{SM} z hřídele na obvod kol, které jsou zpřevodovány pomocí převodného ústrojí. Převodné ústrojí je zadáno převodem $i_{PÚ}$ a účinností $\eta_{PÚ}$.

Rovnice momentu na kole [10]:

$$M_k = M_{SM} \cdot i_{PÚ} \cdot \eta_{PÚ} \quad (13)$$

Kde:

$M_k \dots$	Hnací moment na kole
$M_{SM} \dots$	Moment spalovacího motoru
$i_{PÚ} \dots$	Převodový poměr převodného ústrojí
$\eta_{PÚ} \dots$	Účinnost převodného ústrojí

Hnací síla na kole vychází z hnacího momentu a dynamického poloměru kola. Celkovou hnací sílu na kolech F_k , získáme součtem hnacích sil na hnaných kolech.

Rovnice hnací síly [10]:

$$F_{Ki} = \frac{M_{Ki}}{r} \quad (14)$$

$$F_K = \sum_i F_{Ki} \quad (15)$$

Kde:

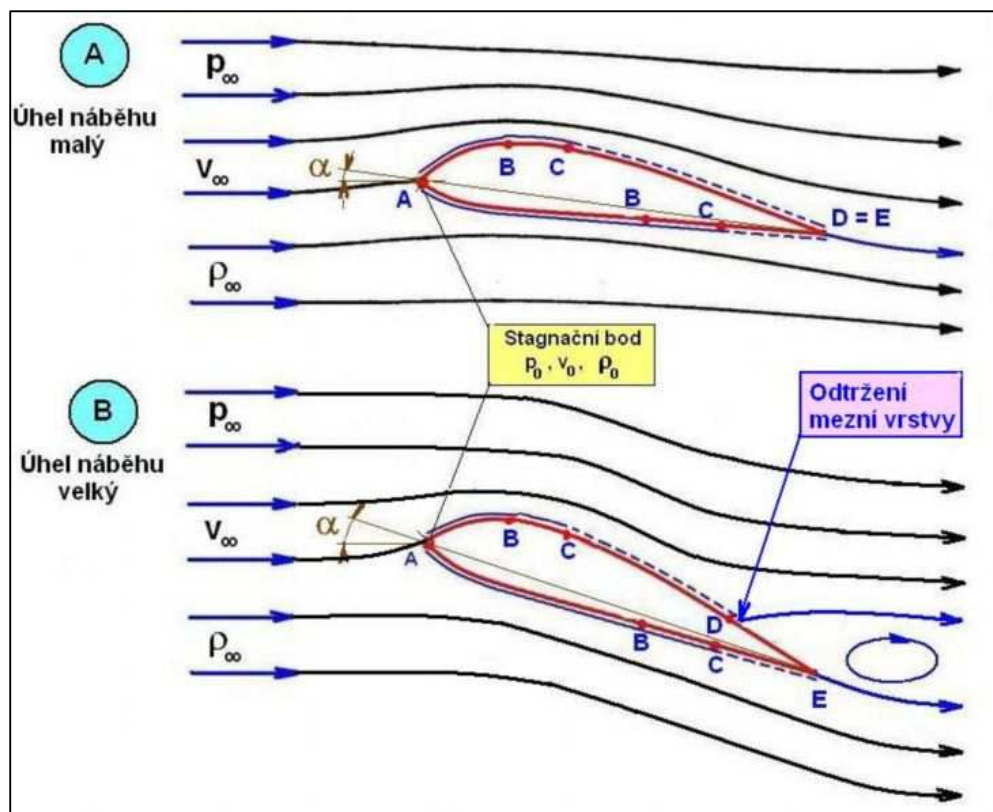
$F_K \dots$	hnací síla na kole
$r \dots$	poloměr kola

2.4 Obtékání profilů

V dnešní době se používá nespočet druhů profilů např. NACA, Clark Y, aj. V jednotlivých katalozích nalezneme geometrické a aerodynamické parametry každého profilu. Geometrický tvar křídla je zadáván pomocí souřadnic nebo je daná profilová křivka aproximována polynomem.

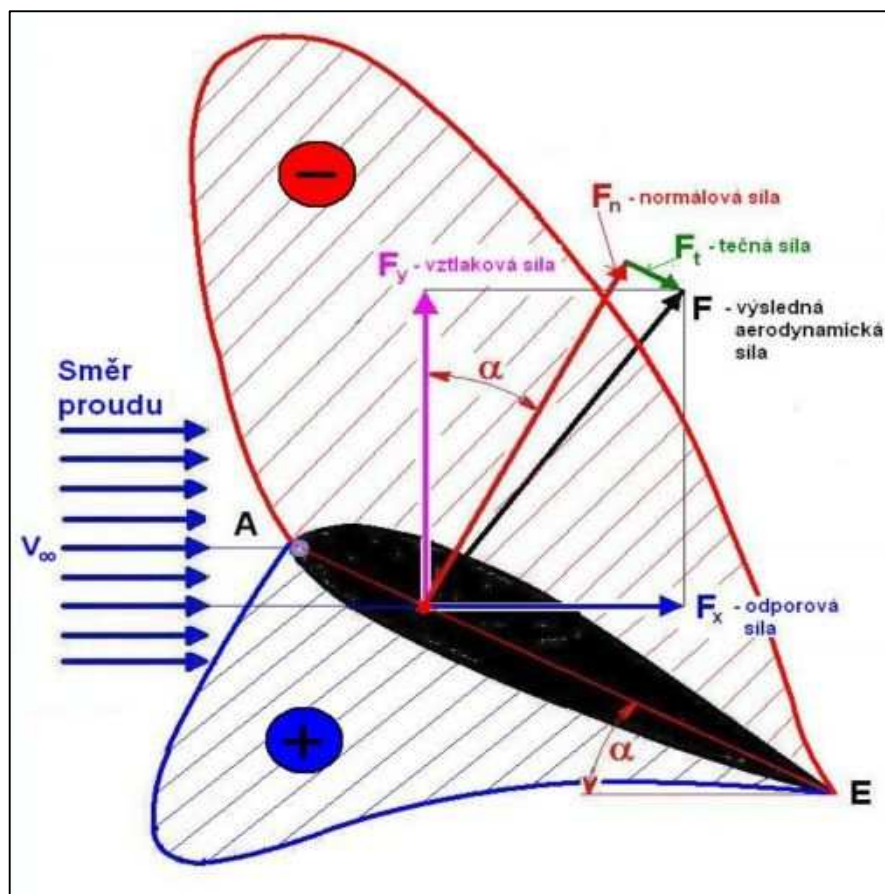
2.4.1 Síly a momenty působící na profil

Na profilu v bodě A, náběžné hrany, je největší tlak na profilu dosahující hodnoty celkového tlaku. Rychlost proudu je zde nulová. Proud pokračuje dále do bodu B, kde dosahuje největší rychlosti a nejmenšího tlaku. Děje se tomu na obou hranách profilu. V bodě C dosahujeme kritického Reynoldsova čísla a zde dochází k změně z laminární mezní vrstvy na turbulentní mezní vrstvu. Tloušťka turbulentní mezní vrstvy mezi body C a D, rapidně narůstá. Umístění bodu D na profilu křídla je ovlivněno úhlem náběhu. Pokud je úhel náběhu nulový nebo malý, je možno bod D přesunout až do bodu E na odtokové hraně. Bude-li úhel náběhu velký, tak v bodě D bude proudění mít nulovou rychlost a dochází k odtržení mezní vrstvy. To zapříčiňuje, že rychlost proudění má záporné hodnoty, tudíž vzniká zpětné proudění. Body B, C, D se spolu s vzrůstajícím úhlem náběhu posouvají směrem k bodu A. Z tohoto důvodu není pro nás tento jev pozitivní a volíme tady namísto toho úhly náběhu takové, kde bod D je totožný s hranou E. [7]



Obr. 12 – Znázornění obtékání profilu [7]

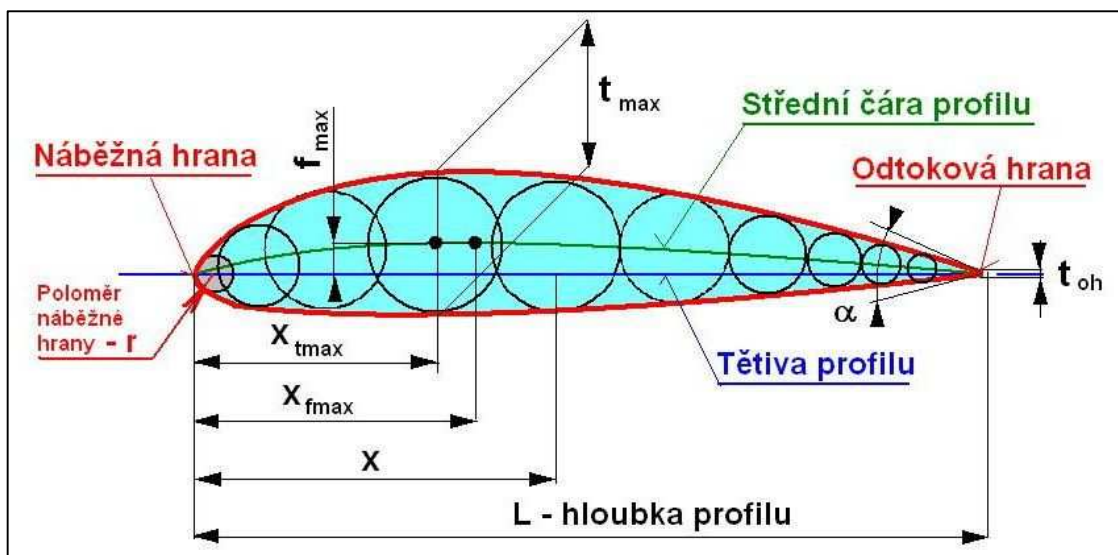
Základní síly působící na profil jsou vztahová síla F_v a odporová síla F_x . Definice těchto sil jsou stejné jako u sil působících na vozidlo. Dále v oblasti kolem profilu vznikají tlakové pole. Tlakové pole nad horní hranou má zápornou hodnotu, podtlak, na spodní hraně má kladnou hodnotu, tedy přetlak. Podtlak vzniká v důsledku rychlejšího proudění okolo horní hrany, u přetlaku tomu je naopak, částice obtékající spodní hranu jsou pomalejší. Takto konfigurována poloha profilu generuje vztlak, který je využíván v letectví. V našem případě, kdy potřebuje, aby křídlo generovalo přitlak, jej jednoduše převrátíme tak, aby hrana s větší rychlostí proudění byla jako spodní hrana směřující směrem k zemi. [7]



Obr. 13 – Rozložení tlaků působících na profil křídla spolu se silami [7]

2.4.2 Křídlo a přítlačné křídlo

Profilem křídla je uzavřená křivka, složená z nekonečně mnoho vepsaných kružnic se středem na střední čáře profilu. Tloušťka křídla je udávána jako poloměr největší vepsané kružnici, označována t_{\max} , hloubka profilu L je určena vzdáleností náběžné hrany až po odtokovou hranu, odpovídá jí délka tětiny. Tětiva profilu je spojnice mezi náběžnou hranou (bod A) a odtokovou hranou (bod E), která je důležitou vztažnou čarou profilu, pokládána jako vztažná osa profilu. Následně pomocí tětiny měříme a nastavujeme úhel náběhu, vzhledem k vodorovné ose x . Náběžná hrana je okraj profilu, kde dochází k rozdělení proudění na dvě části. Je zde nulová rychlost proudění a největší tlak. Odtoková hrana je průsečíkem horní a spodní hrany profilu, dochází zde k opětovnému spojení proudu. [7]



Obr. 14 – Geometrie profilu [7]

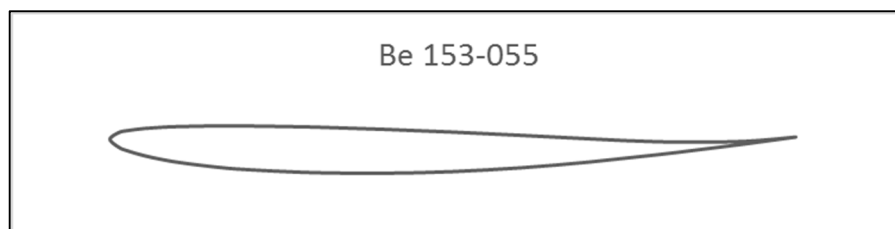
Zadní křídlo na vozidle generuje přítlak. Při maximálních rychlostech dokáže vygenerovat sílu, která je stejně velká jako tíha vozidla. Na obr. 15 můžeme vidět zadní křídlo nacházející se na závodním vozidle BMW E36 Compact. Pro toto vozidlo hledám nové a lepší optimální řešení zadního profilu. Stávající křídlo se stalo referenčním křídlem, které budu srovnávat s dalšími vybranými profily.



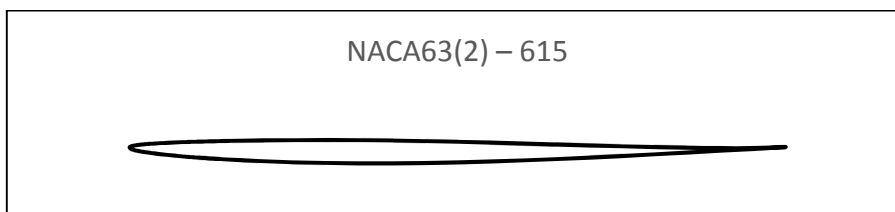
Obr. 15 – Zadní přítláčné křídlo [Autor]

2.4.3 Příklady profilů křídel používaných v motorsportu

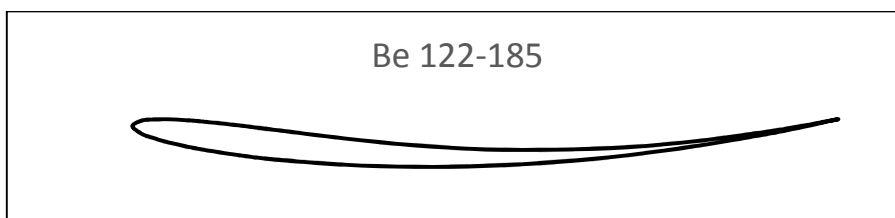
Profily vznikající pro motorsport jsou již dnes vyvíjeny samostatně. Takovými profily jsou například: NACA63(2) – 615 s 50% tloušťkou, Be 122-185 a Be 153-055, tyto vybrané křivky jsou testovanými profily, které budou srovnány s referenčním křídlem. Jednotlivé profily jsou vybrány na základě rešerše a konzultace. Tyto zmíněné profily přímo analyzoval i Enrico Benzing, specializující se na profily pro motorsport.



Graf 1 – Křivka profilu Be 153-055 [Autor]



Graf 2 – Křivka profilu NACA63(2)-615 s 50% tloušťkou [Autor]



Graf 3 – Křivka profilu Be 122-185 [Autor]

3 Návrh metodiky výpočtu aerodynamických vlastností

Výpočet je prováděn v programu Star-CCM+. V této kapitole jsou popsány jednotlivé nutné kroky a nastavení, které je nutno provést k realizaci výpočtu.

- Import CAD dat
- Kontrola importovaných dat
- Definice okrajových podmínek
- Definice výpočetní sítě
- Volba výpočetního modelu a jeho nastavení
- Iniciační výpočet
- Zjemnění sítě vytypovaných oblastí
- Finální výpočet
- Vyhodnocení

3.1 Příprava a sběr nutných podkladů

Prvně je nutno si připravit jednotlivé podklady. Musel se prozkoumat současný stav řešeného problému, změřením rozměrů stávajícího křídla na automobilu. Následně je nutné vyhledat nové srovnávací profily křídel. Rešerše provádíme na základě vyhledávání pomocí internetu, literatury a odborných článků, kde hledáme řešení závodních týmů, studentských týmů formule, aj. Jednotlivé profily nalezneme v různých formátech, může se jednat o CAD model, data v podobě souřadnic $[x,y]$ nebo mohou být zadány polynomem.

3.2 Tvorba geometrie profilu

Nově vybrané profilové křivky je nutno vymodelovat pomocí 3D modelovacího softwaru. Modelovat můžeme v Autodesk Inventoru, PTC CREO, CATIA, nebo rovnou ve Star-CCM+. Do daného softwaru nahrajeme příslušná data profilu. Data nahráváme do roviny xy , tak aby počátek ležel na náběžné hraně a náběžná hrana ležela proti pohybu proudu vzduchu. Nesmí se zapomenout, že delší hrana profilu má směřovat do záporné osy y . Pokračování modelování záleží na typu dat. Pokud již máme model v CAD datech, tak jej pomocí funkce vysunutí jen následně vysuneme do požadované délky. Data zadána pomocí souřadnic $[x,y]$ je nutno převést na požadovanou velikost a to tak, že dané souřadnice vynásobíme požadovanou hloubkou profilu v milimetrech, tímto dostaneme přesné souřadnice profilu v hledané velikosti. Po nahrání do softwaru vzniknou v rovině jednotlivé body o daných souřadnicích $[x,y]$, tyto body je pak nutno spojit pomocí funkce interpolační

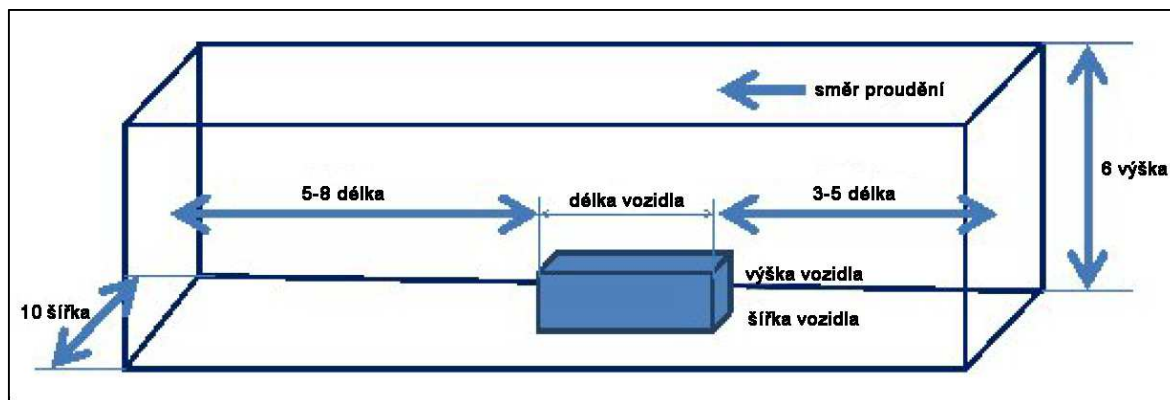
křivka. Data určená polynomem zadáváme do modelovacího softwaru rovnou pomocí funkce křivka výrazu. Následně data vysuneme na potřebnou délku, k tomu poslouží již zmíněná funkce vysunutí.

Po vymodelování jednotlivých modelů, se musí následně vyexportovat do formátu, který je vhodný pro Star-CCM+. Na výběr je několik použitelných formátů, např. step (*.stp), iges (*.igs) nebo parasolid (*.x_b). Následně je nutno po importování modelu do programu Star-CCM+ zkontrolovat, jestli je daný model vhodný pro simulaci, tzn. jestli model nemá žádné volné hrany (Free edges), nespojené hrany (Non-manifold edges) a plochy přes sebe se překrývající (Non-manifold vertices). Kontrola se provádí pomocí funkce oprava povrchu (Repair surface) v záložce části (Parts). Po spuštění kontroly získáme počet daných prvků plochy.

3.3 Definice výpočetní oblasti

Výpočetní oblast je definována podle programu Star-CCM+. Měla by, v experimentech pro simulaci podmínek nechráněných otevřených cest, splňovat podmínku překážkového poměru (Blockage ratio) menší než 0,2 %. Tento poměr je počítán jako poměr mezi velikostí čelní plochy ku průřezu výpočetní oblasti.

Velikost výpočetní oblasti je určována podle obrázku 16, kde jsou jednotlivé minimální hodnoty oblasti dány pomocí násobků délky, šířky a výšky vozidla.



Obr. 16 – Rozměry tunelu [11]

3.4 Import geometrie a definice výpočetní sítě

Připravené 3D modely importujeme do geometrie → 3D-CAD modely (3D-CAD Models). Software nám také umožňuje editaci modelů. Máme zde čtyři základní úpravy:

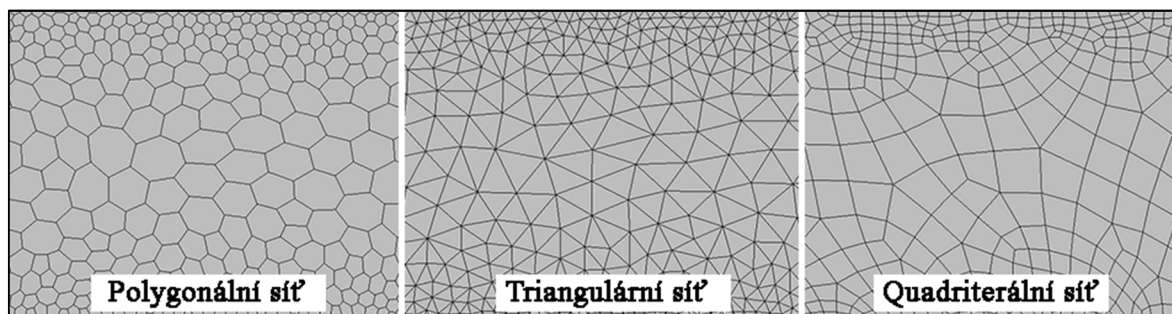
- **Posun** (Translate) – Přesun modelu pomocí zadaných souřadnic.
- **Měřítko** (Scale) – Zvětšení nebo zmenšení modelu v zadaném měřítku.

- **Rotace** (Rotate) – Otáčení modelů kolem os pomocí zadaných stupňů rotace.
- **Zrcadlit** (Mirror) – Možnost zkopírovat, zrcadlit, model podle dané osy.

Tyto základní úpravy lze převést do pracovních parametrů (design parameters), které slouží k přímým úpravám modelů v pracovním prostředí simulace, aniž bychom museli složitě přecházet do úprav (edit) modelů samotných.

3.4.1 Výpočetní síť

Sítí chápeme jako rozdělení výpočetní plochy na jednotlivé buňky, které jsou dané tvarem odvíjející se od typu sítě. Pro 2D automatickou síť v programu Star-CCM+ jsou na výběr tři typy: polygonální (polygonal mesh), triangulární (triangular mesh) a quadrilaterální (quadrilateral mesh). Jednotlivé buňky pak reprezentují oblast, kde je prováděn výpočet fyzikálních veličin. Z toho vyplývá, že kvalita sítě přímo ovlivňuje kvalitu dané simulace. Kvalita a množství rozdělení výpočetní plochy jsou limitovány výpočetní technikou, proto z toho důvodu v praxi využíváme větší koncentraci buněk v místech důležitého proudění nebo oblasti přestupu tepla, která jsou z hlediska simulace klíčová. A právě v místech méně důležitých pro výpočet, např. volný prostor ve výpočetní oblasti, tam bude mít síť menší hustotu.



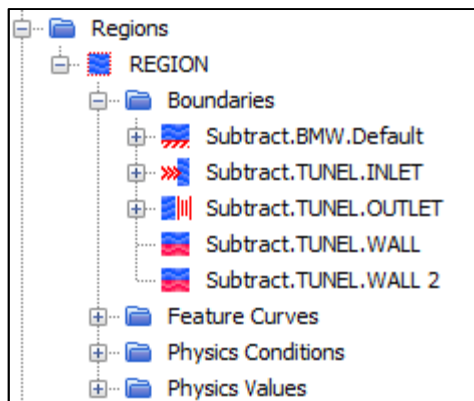
Obr. 17 – Typy sítí [Autor]

3.5 Definice okrajových podmínek a nastavení výpočtu

Okrajové podmínky (Boundaries) jsou ve 3D simulaci povrchy nebo v 2D simulaci linie, které definují výpočetní oblast (Region). Ke každé okrajové podmínce lze přiřadit daný typ. Oblast může mít jednu podmínku nebo jsou složeny z více různých druhů. To se odvíjí od zadání simulace. Základní typy okrajových podmínek důležité pro aerodynamiku:

- **Stěna** (Wall)
- **Volný proud** (Free Stream)
- **Vstup hmotnostního toku** (Mass Flow Inlet)

- **Přesah sítě** (Overset Mesh)
- **Tlakový výstup** (Pressure Outlet)
- **Stagnační vstup** (Stagnation Inlet)
- **Symetrická rovina** (Symmetry Plane)
- **Vstupní rychlost** (Velocity Inlet)



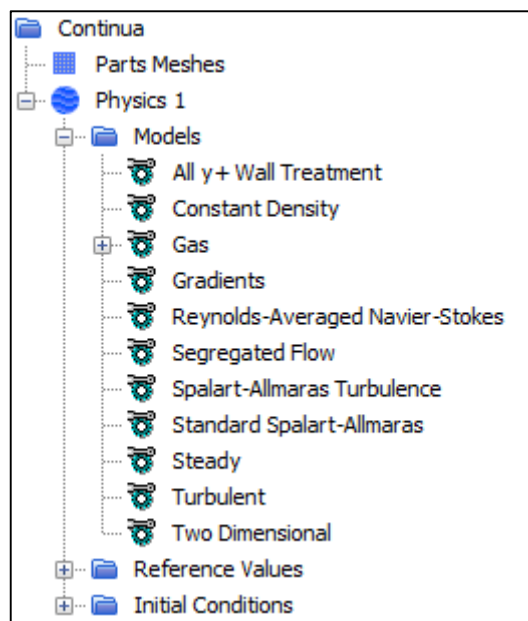
Obr. 18 – Strom okrajových podmínek v programu Star-CCM+ [Autor]

3.5.1 Nastavení výpočtu

Nastavení provádíme v části kontinua (Continua), kde definujeme výpočetní síť (Mesh Continuum), a výpočetní fyzikální model (Physics Continuum). Následně vybrané modely aplikujeme na danou vybranou oblast. Jednotlivé základní modely pro nastavení:

- **Prostor:**
 - **Osově symetrický (Axisymmetric)** – Prostor osově souměrný. Používá se pro rotační součásti (např. potrubí).
 - **Dvourozměrný (Two Dimensional)** – Prostor zadaný dvěma souřadnicemi $[x,y]$, souřadnice z je rovna nule.
 - **Trojrozměrný (Three Dimensional)** – Prostor zadaný třemi souřadnicemi $[x,y,z]$
- **Stěnová funkce All y^+** - Tato funkce nám interpretuje kvalitu výsledku proudění v oblasti kolem stěny. Pro určení hodnoty funkce vybíráme jednodušší a méně náročnější řešení, a to pomocí empirických vztahů stěnové funkce. Výběr modelu záleží na hodnotě y^+ , jedná se o tyto modely: low y^+ , high y^+ a all y^+ . Poslední zmíněný model All y^+ je nejpřizpůsobivější v použití, tím pádem je přijatelný pro převážnou část modelů turbulencí.
- **Proudící látka:**
 - **Plyn (Gas)** – Používán pro simulaci čistého plynu, základním plynem je vzduch (air).

- **Tekutina (Liquid)** - Simulace čisté kapaliny, základem je voda.
- **Pevná látka (Solid)** – Simulace pevné látky, základem modelu je hliník (Al).
- **Čas:**
 - **Stacionární proudění – nemění se v čase (Steady)**
 - **Nestacionární proudění (unsteady)**
- **Plyn (Gas)** – Vybíráme vhodný model plynu:
 - Ideální plyn
 - Konstatní hustota – plyn je nestlačitelný
 - Reálný plyn
- **Metoda řešení RANS** – viz. kapitola 3.5.1
- **Druhy proudění:**
 - **Odtržené proudění (Segregated flow)** – Model řešící postupně rovnice hybnosti po jednotlivých rozměrech.
 - **Přilnuté proudění (Coupled flow)** – Tento model najednou řeší rovnice pro hmotnost, hybnost a energii po jednotlivých pseudo-časových krocích.
- **Modely turbulentního proudění:**
 - **Jednorovnicové**
 - Spalart-Allmaras
 - **Dvourovnicové**
 - K-Epsilon
 - K-Omega
 - Reynolds Stress
- **Typ proudění**
 - Laminární
 - Turbulentní

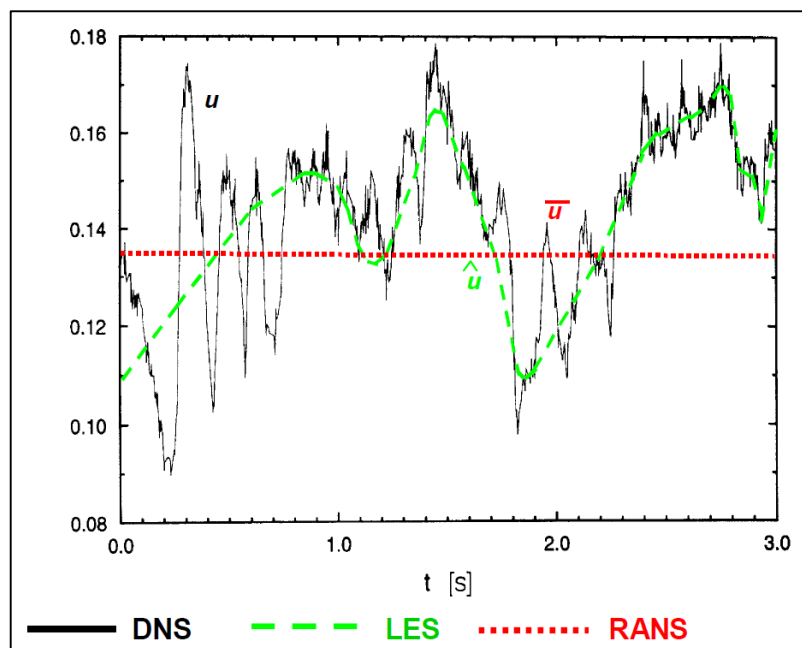


Obr. 19 – Strom kontinuí v programu Star-CCM+ [Autor]

3.5.2 Matematické metody modelování turbulentního proudění

Problematika modelace turbulentního proudění se neustále vyvíjí spolu s rozvojem matematického, fyzikálního a technického oboru. Dnes máme tři různé přístupy k řešení numerických simulací vycházející ze zjednodušení rovnic proudění. [12]

- **Metoda přímé simulace** (DNS – Direct Numerical Simulation) – Má velké kapacitní nároky na počítač, využívá velmi jemné sítě.
- **Metoda velkých virů** (LES – Large Eddy Simulation) – Tato metoda využívá modelování velkých virů v prostorově časově závislých útvarech, které je možno zachytit v dané síti. I když je tato metoda, taky velmi náročná na počítačovou techniku, lze ji dnes také počítat.
- **Metoda časového středování** (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) – Dnes nejpoužívanější metoda, náročnost na počítačovou kapacitu je u této metody nejmenší. Metoda funguje na principu časového středování veličin turbulence a následně časového středování bilančních rovnic.



Obr. 20 – Metody modelování turbulentního proudění [12]

3.6 Metody analýzy výsledků

Metody analýzy můžeme rozdělit na dva druhy. Prvním druhem je grafická analýza výsledků, která je založená na zkušenostech řešitele. V grafické analýze popisujeme, jak se chová proudění, sledujeme průběh tlakových polí, tvorbu úplavu aj. Druhý typ analýzy je založený na výsledcích numerických výpočtů. Jednotlivé výsledky 2D numerických výpočtů, počítaných v programu Star-CCM+, odpovídají modelu o šířce 1 m. Posuzovanými daty jsou čelní plocha S_x , vztlak, odpor, koeficient odporu c_D (coefficient drag), koeficient vztlaku c_L (coefficient lift) a aerodynamická efektivita A_F . Vzorce pro jednotlivé koeficienty jsou odvozeny z rovnice odporu vzduchu O_v (10). Aerodynamická efektivita je poměrem koeficientu vztlaku a koeficientu odporu.

Rovnice koeficientu odporu vzduchu [10]:

$$c_D = \frac{2 \cdot F_x}{S_x \cdot \rho \cdot v^2} \quad (16)$$

Rovnice koeficientu vztlaku [10]:

$$c_L = \frac{2 \cdot F_y}{S_y \cdot \rho \cdot v^2} \quad (17)$$

Vztah pro aerodynamickou efektivitu [10]:

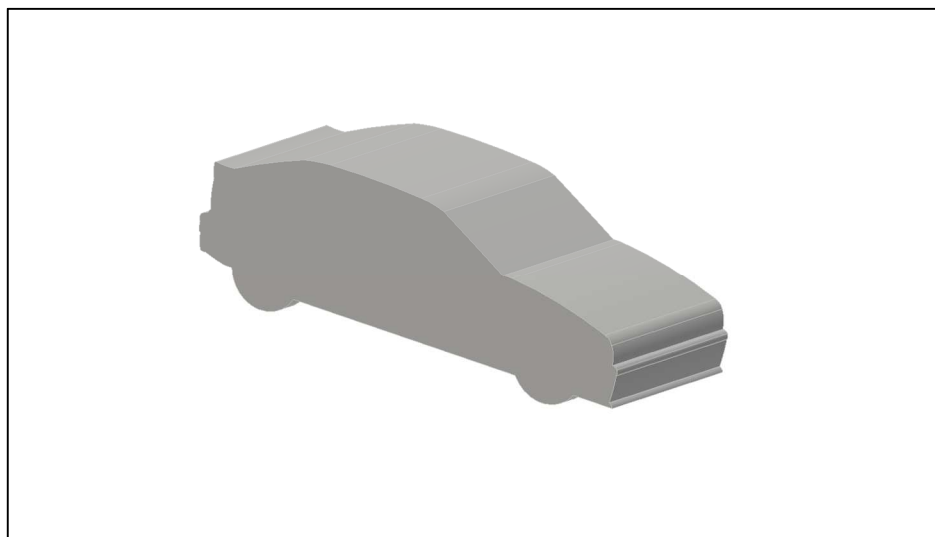
$$A_F = \frac{c_L}{c_D} \quad (18)$$

4 Příprava 3D dat

Modely byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor. Postupoval jsem podle předchozí kapitoly.

4.1 Tvorba 3D modelu vozidla

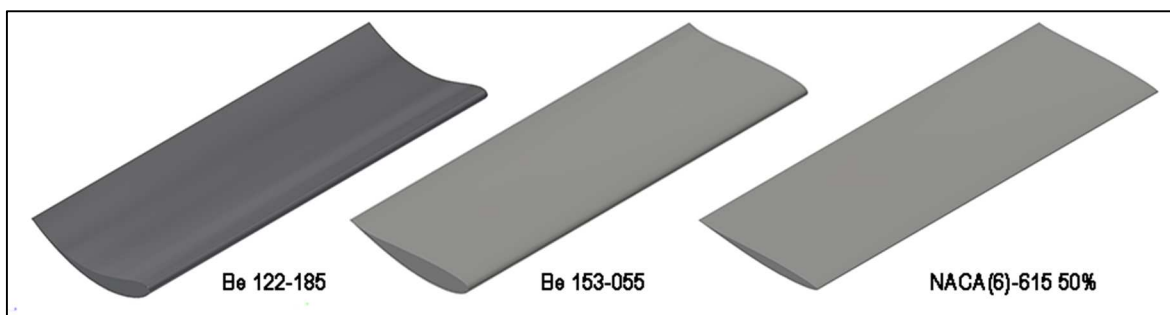
Model vozidla není reálný 3D model, ale jedná se o zjednodušený model. Jde o boční pohled vozidla vysunutý do určité hloubky. Tvořil jsem jej tak, že nejprve jsem si našel nejvhodnější boční pohled na automobil, v mém případě se jednalo o nákres z manuálu automobilu. Obrázek byl použit jako šablona v softwaru Autodesk Inventor zvětšený na rozměr vozidla. Obrys automobilu jsem vytvořil pomocí interpolační křivky v Autodesk Inventoru. Vzniklou křivku kopírující boční pohled jsem vysunul na rozměr vozidla.



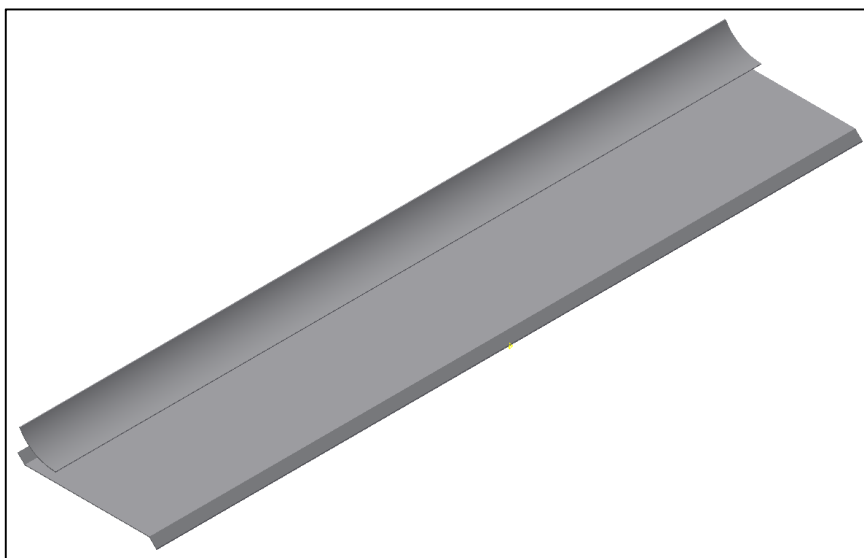
Obr. 21 – Model vozu BMW E36 [Autor]

4.2 Tvorba 3D modelů profilů

Profily jsem modeloval na základě dat souřadnic v Excelu. Data jsem musel ještě před nahráním do softwaru Autodesk Inventor zvětšit na požadovanou hloubku profilu. V mém případě jsem jednotlivé souřadnice vynásobil hodnotou 350 mm, což je hloubka referenčního křídla vozidla. Následně jsem jednotlivé body profilu spojil interpolační křivkou, vzniklý profil jsem následně vysunul na délku 1 m, pomocí funkce vysunutí.



Obr. 22 – Modely jednotlivých profilů [Autor]



Obr. 23 – Model referenčního křídla [Autor]

4.3 Kontrola geometrie 3D

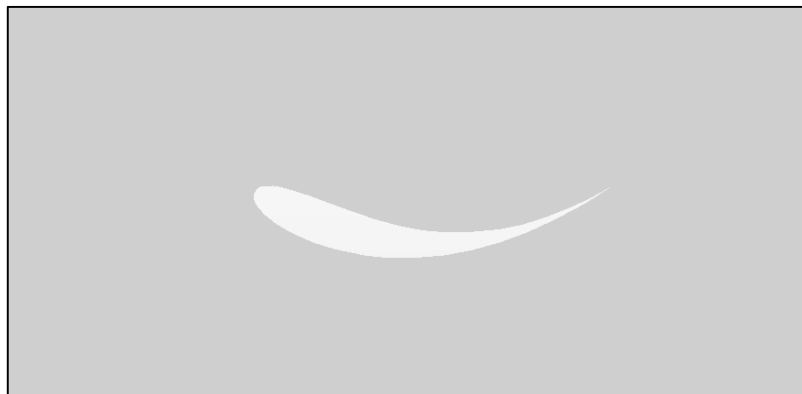
Takto vytvořené modely jsem následně vyexportoval do požadovaných formátů step (*.stp), iges (*.igs) nebo parasolid (*.x_b). Vybral jsem jeden z těchto formátů, který jsem následně nahrál do softwaru na výpočet. Data jsem exportoval do formátu parasolid (*.x_b), protože v ostatních případech se stávalo, že některé hrany modelů nebyly po exportu spojeny nebo měly jiné závady. Tyto kontroly jsem přímo realizoval v programu Star-CCM+, pomocí opravy povrchu (Repair Surface). Kde jsem zkontroloval počty volných hran (Free edges), nespojených hran (Non-manifold edges) a plochy přes sebe se překrývajících (Non-manifold vertices). Jednotlivé složky se rovnaly nule, modely byly v pořádku.

#	Display	Threshold	Count
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Free edges (default)	0
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Non-manifold edges (default)	0
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Non-manifold vertices (default)	0

Obr. 24 – Kontrola kvality modelu [Autor]

4.4 Příprava modelů k využití v aerodynamických výpočtech

V první části jsem modeloval výpočetní oblast pro křídla, protože jsem simuloval jednotlivá křídla a následně je porovnával mezi sebou. Velikost výpočetní oblasti byla určena podle kapitoly 3.3. Od vytvořené výpočetní oblasti jsem následně odečetl (Subtract) simulovaný profil.



Obr. 25 – Detail výpočetní oblasti profilu [Autor]

Pro simulaci vybraného nejlepšího profilu byla potřeba vytvořit nulový bod, který byl brán jako výchozí pozice křídla. Od toho nulového bodu bylo křídlo posunováno v ose x a v ose y. Souřadnice nulového bodu jsem určil pomocí softwaru Autodesk Inventor. Nulový bod se nachází na spojnici přímky nejvyššího bodu střechy vozidla, která je rovnoběžná s osou x a přímkou procházející rohovým bodem kufru rovnoběžnou s osou y. Souřadnice toho bodu jsou [4136;1190;0] mm (viz. obr. 26).



Obr. 26 – Nulový bod pro křídlo [Autor]

Ve druhé části jsem připravil výpočetní oblast pro simulaci vybraného křídla spolu s modelem vozidla podle kapitoly 3.3, která nám udává její rozměry. Následně jsem musel odečíst zkoumané modely z výpočetní oblasti. Toto odečtení jsem provedl pomocí funkce odečíst (Subtract), výsledkem je výpočetní oblast s počítaným modelem. Na obrázku 27 je připravený model výpočetní sítě, kde šedá plocha znamená plochu proudícího vzduchu a bílá plocha je obtékaný model.

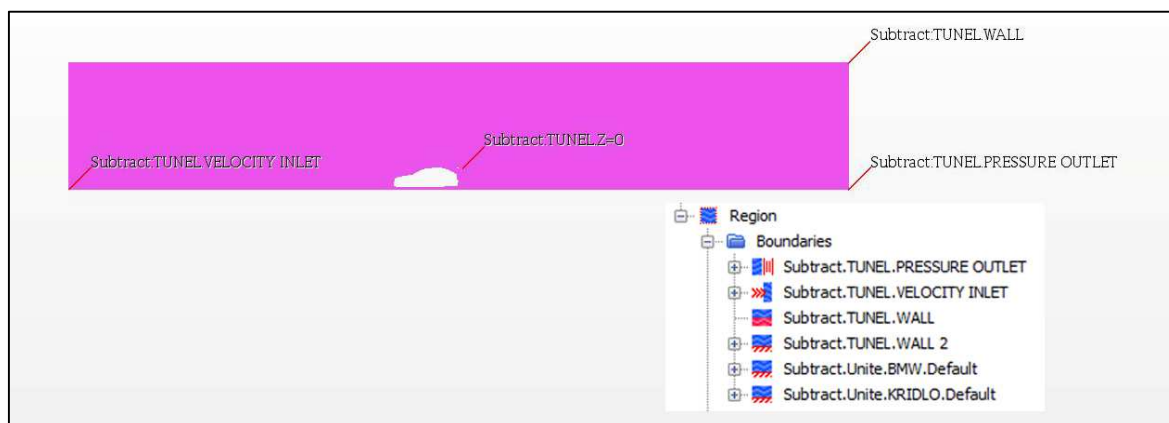


Obr. 27 – Detail výpočetní oblasti po odečtení simulovaného modelu. [Autor]

4.5 Tvorba výpočetního modelu dle definované metodiky

Výpočet byl nastavován podle kapitoly 3.5, ale nejprve byly určeny okrajové podmínky. V aerodynamických simulacích, přesněji v mém 2D numerickém výpočtu, byly určeny tyto okrajové podmínky, které rozdělují výpočetní oblast (tunel) na stěny (Walls), vstupní

rychlost (Velocity inlet), tlakový výstup (Pressure outlet), strop a podlaha byly určeny jako symetrická rovina (Symmetry plane) a obtékané těleso jako stěna (Wall).



Obr. 28 – Okrajové podmínky simulovaného modelu [Autor]

Pro výpočet byl nastaven fyzikální model pro všechny profily stejný. Ve výpočtu byl vyměněn jen model profilu a byla aktualizována výpočetní síť. Jednotlivé fyzikální modely použité pro nastavení výpočtu jsou umístěny v tabulce 1 pro lepší přehlednost.

Tabulka 1 – Nastavení fyzikálního modelu výpočtu pro křídlo [Autor]

Prostor (Space)	2D (Two Dimensional)
Čas (Time)	(Steady)
Materiál (Material)	Plyn (Gas)
Tok (Flow)	(Segregated Flow)
Stavová rovnice (Equation of State)	Ideální plyn (Ideal gas)
Energie (Energy)	(Segregated Fluid Temperature)
Typ proudění (Viscous Regime)	Turbulentní (Turbulent)
Model výpočtu turbulence (Reynolds-Averaged Turbulence)	K-Epsilon Turbulence
Stěnová funkce (Wall treatment)	Funkce All y+ (All y+ Wall Treatment)

Tabulka 2 – Nastavení fyzikálního modelu výpočtu vozidla a křídla [Autor]

Prostor (Space)	2D (Two Dimensional)
Čas (Time)	(Steady)
Materiál (Material)	Plyn (Gas)
Tok (Flow)	(Segregated Flow)
Stavová rovnice (Equation of State)	Ideální plyn (Ideal gas)
Energie (Energy)	(Segregated Fluid Temperature)
Typ proudění (Viscous Regime)	Turbulentní (Turbulent)
Model výpočtu turbulence (Reynolds-Averaged Turbulence)	Spalart-Allmaras Turbulence
Stěnová funkce (Wall treatment)	Funkce All y+ (All y+ Wall Treatment)

4.6 Analýza vybraných profilů a jejich základní charakteristiky

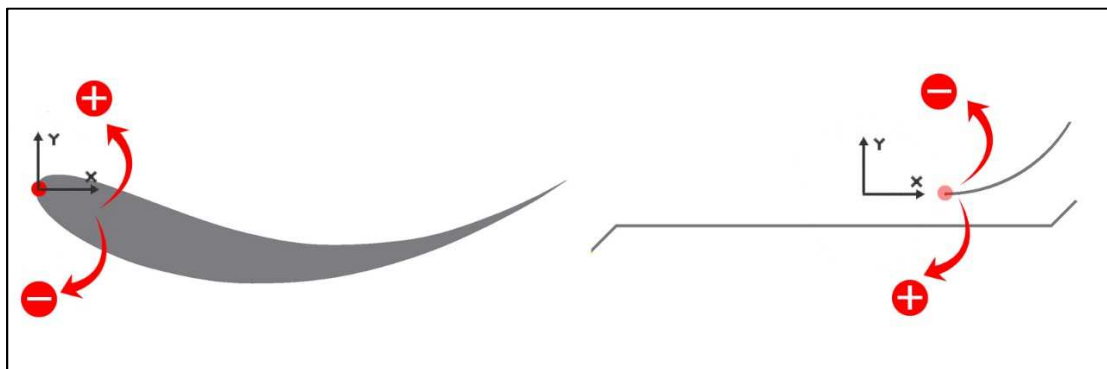
Jednotlivé modely jsem posuzoval jak graficky, tak exaktně. Výsledky numerického výpočtu byly zpracovány do tabulek a následně do grafů, tak aby bylo možno je jednoduše popsat a porovnat mezi sebou. Postup analýzy byl u všech jednotlivých profilů stejný. Nejdříve jsem zkontroloval parametry sítě, od kterých se odvíjí kvalita výpočtu. Poté jsem popsal grafické řešení proudění kolem modelů a výsledky numerického výpočtu jsem vložil do tabulek a grafů.

Modely profilů byly nakláněny u referenčního křídla po 5 stupních v obou směrech a u vybraných modelů byly kroky po 3 stupních (viz. obr. 29).

Pro výpočet byly použity tyto referenční hodnoty:

- Referenční tlak: 101 325 Pa
- Hustota: 1,175 kg/m³
- Referenční rychlost: 27.8 m/s

Všechny výsledky z tabulek jsou brány jako absolutní hodnota, protože na první pohled vztlak v záporných hodnotách působí nesprávně. Záporná hodnota vztlaku znamená, že profil generuje přítlak.



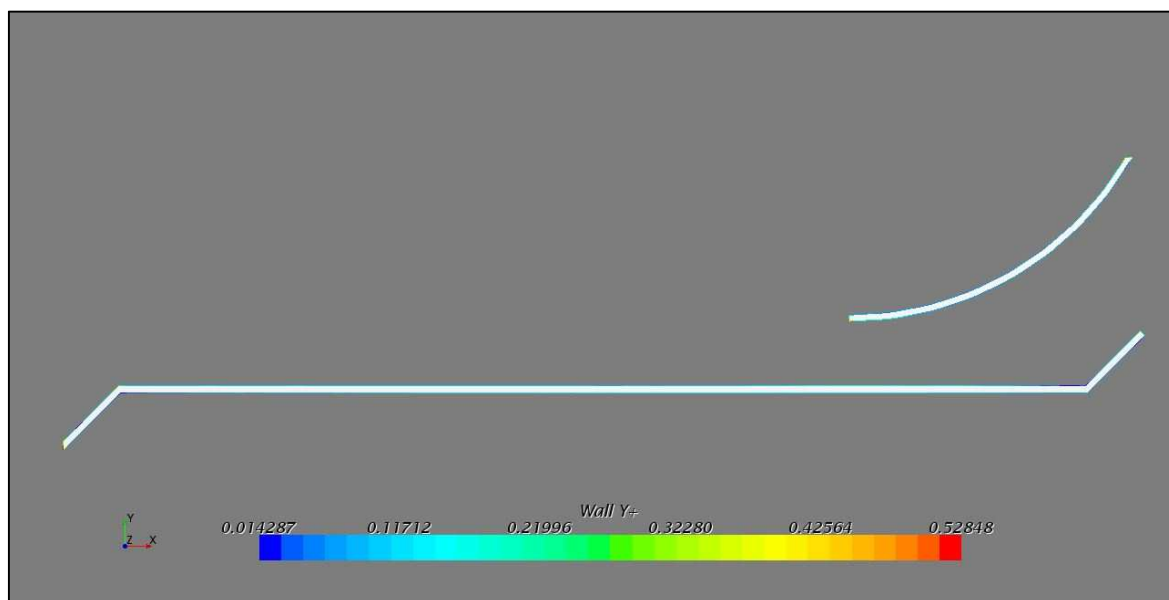
Obr. 29 – Směry natočení profilů [Autor]

4.6.1 Analýza referenčního modelu

Simulace referenčního modelu byla pro mě základem, podle které jsem pak hodnotil jednotlivé modely. Její analýza se skládá ze tří fází, stejně jako u všech ostatních profilů.

Kontrola výpočetní sítě

Prováděl jsem kontrolu kvality podle zmíněných kvalitativních aspektů. Prvním kontrolním aspektem byla hodnota stěnové funkce Wall y^+ , která nesměla být větší než 1. Hodnota u referenčního křídla je 0.528, tím byl první aspekt splněn.



Obr. 30 – Grafické zobrazení stěnové funkce Wall y^+ [Autor]

Dalším aspektem byla kontrola, jestli nemá síť z topologického hlediska negativní obsah. Síť referenčního křídla byla z tohoto hlediska topologicky validní, protože nemá žádný negativní obsah buněk.

```
-> MESH VALIDITY:
Mesh is topologically valid and has no negative volume cells.
```

Obr. 31 – Výpis z diagnostiky sítě – Kontrola negativního objemu [Autor]

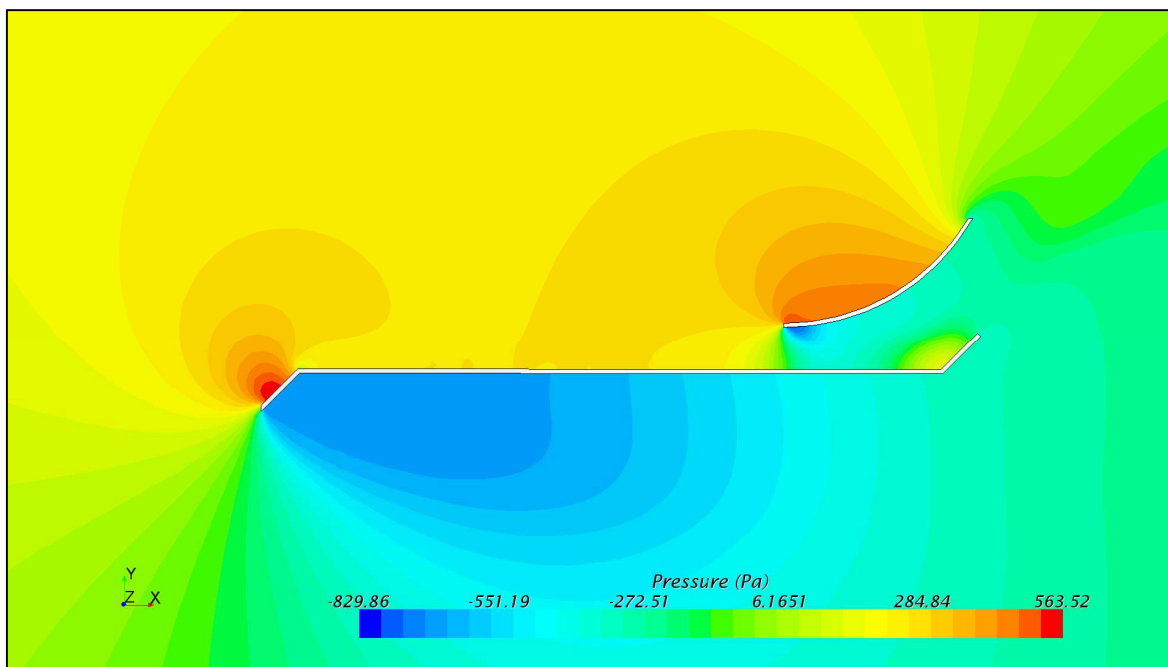
Posledním kontrolovaným aspektem byl úhel zakřivení (skewness angle), tento úhel by neměl být větší než 85 stupňů. I v tomto případě byla podmínka splněna, protože hodnota úhlu zakřivení je 66,21 stupňů. Výpočetní síť je topologicky validní.

```
Volume Change:
Minimum Volume Change: 2.599584e-03
Maximum Volume Change: 1.000000e+00
      Volume Change < 0.000000e+00      0      0.000%
0.000000e+00 <= Volume Change < 1.000000e-06      0      0.000%
1.000000e-06 <= Volume Change < 1.000000e-05      0      0.000%
1.000000e-05 <= Volume Change < 1.000000e-04      0      0.000%
1.000000e-04 <= Volume Change < 1.000000e-03      0      0.000%
1.000000e-03 <= Volume Change < 1.000000e-02     106     0.251%
1.000000e-02 <= Volume Change < 1.000000e-01     194     0.460%
1.000000e-01 <= Volume Change <= 1.000000e+00   41888    99.289%
Maximum boundary skewness angle in region = 6.621007e+01 deg
```

Obr. 32 – Výpis z diagnostiky sítě – Kontrola úhlu zakřivení [Autor]

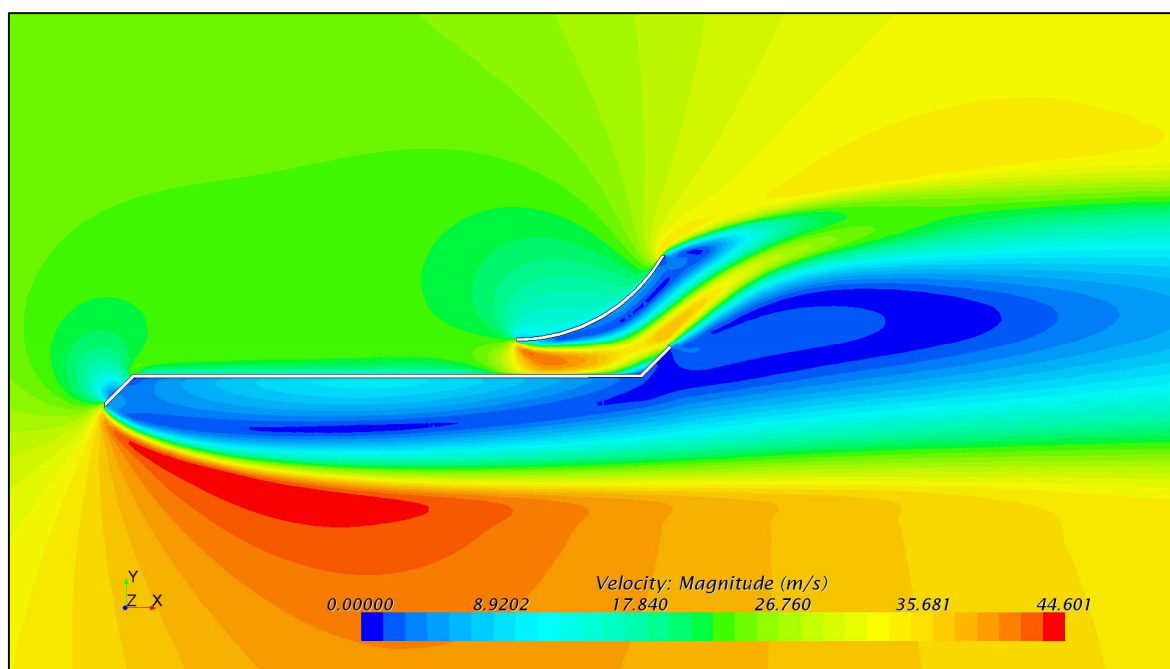
Grafické výsledky simulace

Průběh tlaku kolem referenčního křídla vidíme na obr. 33. Červené pole symbolizuje přetlak a modré pole podtlak.



Obr. 33 – Průběh tlaku referenčního křídla při referenční rychlosti [Autor]

Na obr. 34 vidíme průběh rychlosti kolem profilu. Ve stagnačním bodě vidíme modře zbarvený průběh, symbolizující nulovou rychlost proudění. Z důvodu atypického tvaru referenčního křídla vzniká pod jeho profilem pole s nulovou rychlostí. To stejné platí i pro pole s nulovou rychlostí vznikající pod vrchním elementem křídla.



Obr. 34 – Průběh rychlosti referenčního křídla při referenční rychlosti [Autor]

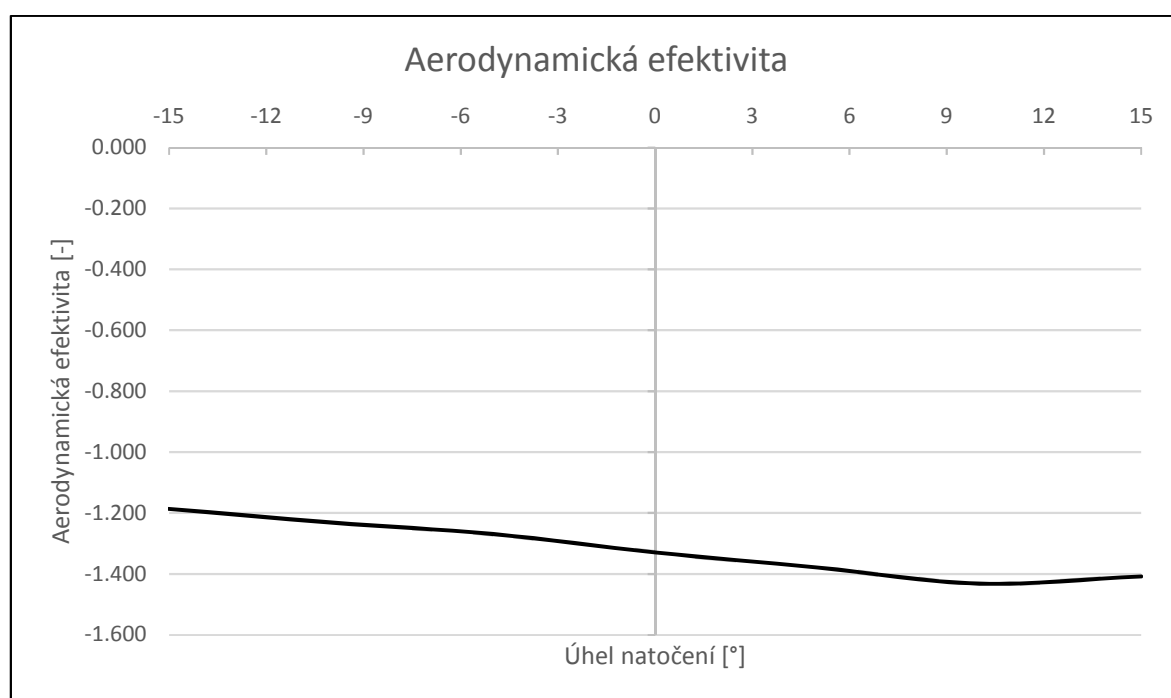
Numerické výsledky simulace

Numerickým výpočtem jsem získal výsledky vztlaků, odporů, velikosti čelních ploch pro vztlak a odpor, koeficient odporu c_D , koeficient vztlaku c_L a aerodynamickou efektivitu. Na základě těchto hodnot jsem vždy vybíral nejlepší úhel naklopení daného křídla. Jak již bylo zmíněno, referenční křídlo jsem naklápěl při výpočtu po 5 stupních. Naklápěl jsem jen vrchní segment referenčního křídla a naklápění do kladného směru bylo jen orientační, protože v reálu nám konstrukční řešení nedovoluje naklápět křídlo do kladného směru, i když jsou výsledky příznivější. Tímto byly brány v potaz jen výsledky od 0 stupňů až po – 15 stupňů.

Z tabulky 3 můžeme vyčíst, že nejlepším naklopením je pro nás 0 stupňů, což je tedy výchozí nastavení křídla. Při tomto úhlu natočení máme největší aerodynamickou efektivitu A_F křídla, čelní plocha v ose x a odpor jsou ze zbývajících řešení nejmenší, což je taky kladným jevem.

Tabulka 3 – Výsledky simulace referenčního křídla při referenční rychlosti [Autor]

Úhel natočení [°]	Vztlak [N]	Odpor [N]	Čelní plocha S_{lift} [m ²]	Čelní plocha S_{drag} [m ²]	C_L	C_D	A_f
-15	-251.410	68.590	0.335	0.109	-1.654	1.394	-1.186
-10	-253.320	62.570	0.335	0.102	-1.666	1.353	-1.231
-5	-250.800	55.970	0.335	0.095	-1.650	1.300	-1.269
0	-242.220	47.550	0.335	0.088	-1.593	1.199	-1.329
5	-243.910	42.250	0.336	0.080	-1.602	1.162	-1.379
10	-234.610	35.410	0.340	0.073	-1.524	1.064	-1.431
15	-227.730	31.340	0.343	0.066	-1.466	1.041	-1.408



Graf 4 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor]

V tabulkách 4 a 5 jsou vypočteny jednotlivé hodnoty pro odpor vzduchu a přítlačnou sílu, které jsou vztaženy k danému úhlu naklonění a rychlosti proudění.

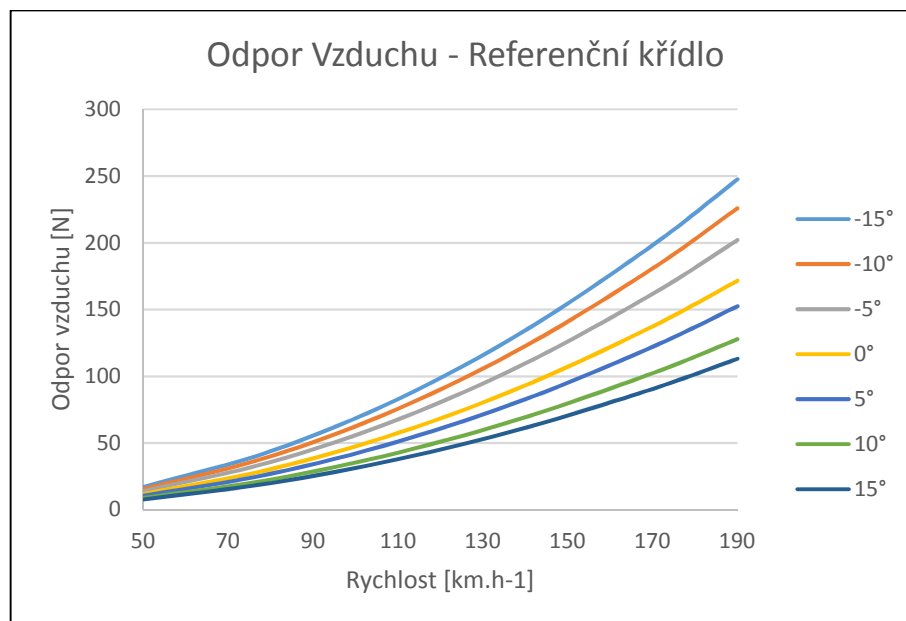
Tabulka 4 – Hodnoty odporu referenčního křídla v závislosti na rychlosti [Autor]

Odpor vzduchu [N]						
Rychlost [km/h]	50	80	110	140	170	190
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
-15°	17.1	43.9	83	134	198	248
-10°	15.6	40	75.7	123	181	226
-5°	14	35.8	67.7	110	162	202
0°	11.9	30.4	57.5	93.2	137	172
5°	10.6	27	51.1	82.8	122	153
10°	8.85	22.7	42.8	69.4	102	128
15°	7.84	20.1	37.9	61.4	90.6	113

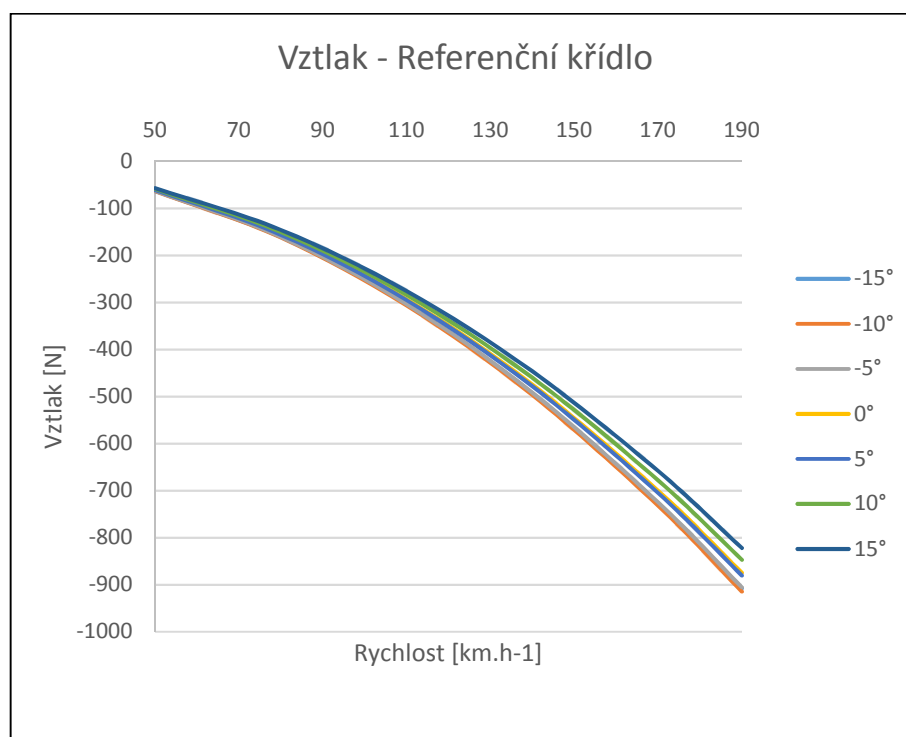
Tabulka 5 – Hodnoty vztlaču referenčního křídla v závislosti na rychlosti [Autor]

Vztlak [N]						
Rychlost [km/h]	50	80	110	140	170	190
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
-15°	-62.9	-161	-304	-493	-727	-908
-10°	-63.3	-162	-307	-497	-732	-914
-5°	-62.7	-161	-303	-492	-725	-905
0°	-60.6	-155	-293	-475	-700	-874
5°	-61	-156	-295	-478	-705	-881
10°	-58.7	-150	-284	-460	-678	-847
15°	-56.9	-146	-276	-446	-658	-822

Na grafech 5 a 6 můžeme nejlépe vidět aerodynamické možnosti referenčního křídla. Odpor vzduchu narůstá mezi úhlem natočení 0 stupňů a -15 stupňů téměř o třetinu, ale zato zvýšení přítlaku nijak nepozorujeme. Proto je nejlepším úhlem natočení 0 stupňů, který jsem zmínil výše.



Graf 5 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]



Graf 6 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]

4.6.2 Analýza profilu NACA63(2)-615

Prvním vybraným profilem pro numerický výpočet byl NACA 63(2)-615. Nejprve jsem zkontroloval kvalitu a validitu výpočetní sítě, zhodnotil grafické řešení a výsledky numerického výpočtu.

Kontrola geometrie

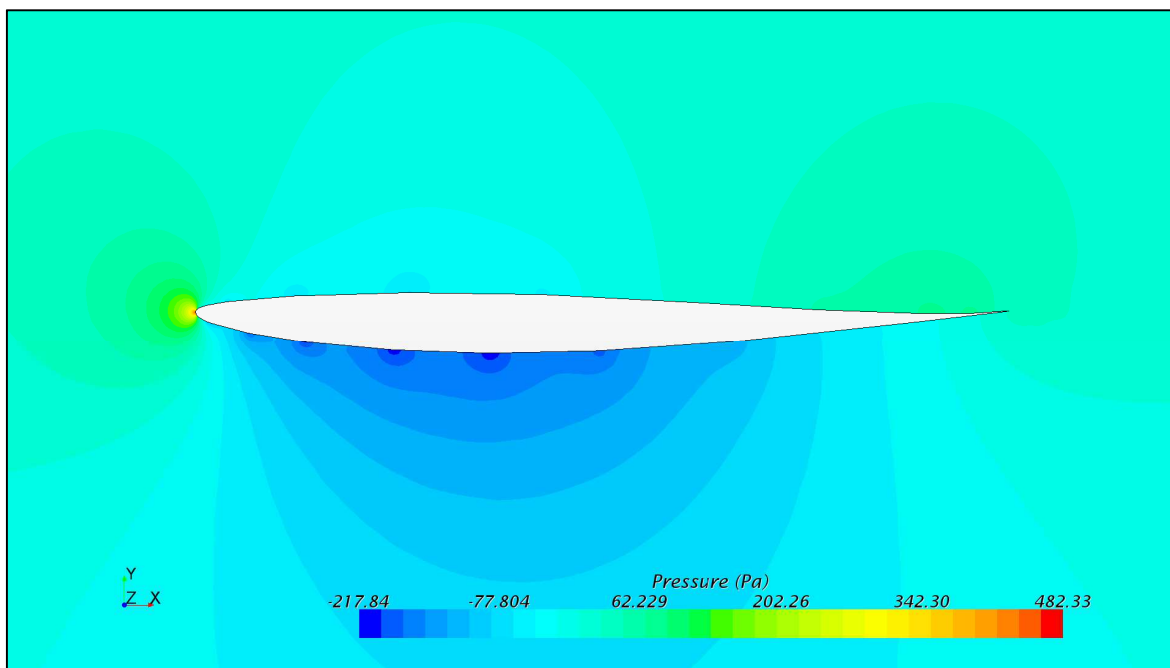
U této kontroly máme tři podmínky:

- Hodnota stěnové funkce (Wall y^+) by měla být v rozmezí 0 až 1
- Výpočetní síť nesmí mít žádný negativní obsah
- Úhel zakřivení (Skewness angle) měl by být menší než 85 stupňů

Hodnota stěnové funkce (Wall y^+) je 0,31, tato hodnota je menší než jedna a tím byla podmínka stěnové funkce splněna. Z diagnostiky sítě jsem získal informace ohledně zbylých dvou podmínkách. Síť nemá žádný negativní objem a úhel zakřivení je 74,287 stupňů. Tímto byly splněny obě dvě zbylé podmínky, a o síti můžu říct, že je topologicky validní pro výpočet.

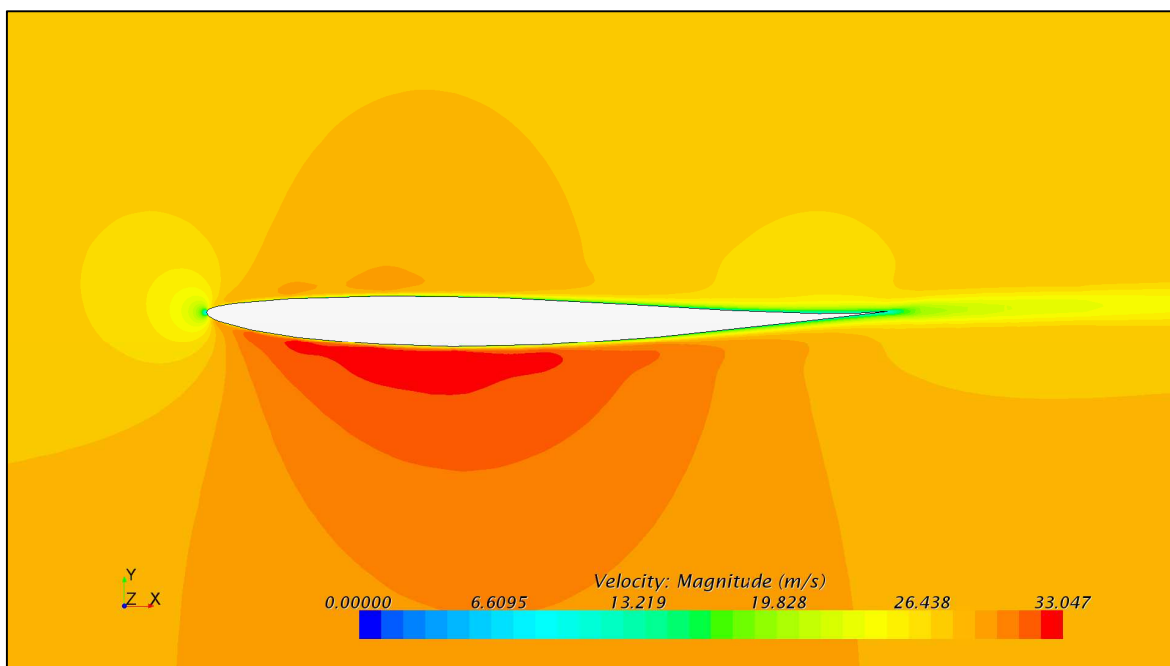
Grafické výsledky simulace

Z průběhu tlaku kolem profilu v nulovém úhlu naklopení je viditelné, že se nad profilem vytváří jen mírný přetlak. Tento jev nastává z důvodu nulového úhlu natočení a také je to způsobeno tvarem profilu. Pod profilem se nám vytváří podtlak, tmavě modrá plocha. Na náběžné hraně profilu vidíme žluté až červené zbarvení plochy značící největší tlak, jedná se o stagnační bod.



Obr. 35 – Průběh tlaku profilu NACA63 [Autor]

Z průběhu rychlosti vidíme, že rozdíly v rychlostech nad horní hranou a spodní hranou nejsou tak výrazné. Ve stagnačním bodě při detailním přiblížení je vidět nulová rychlost proudění.

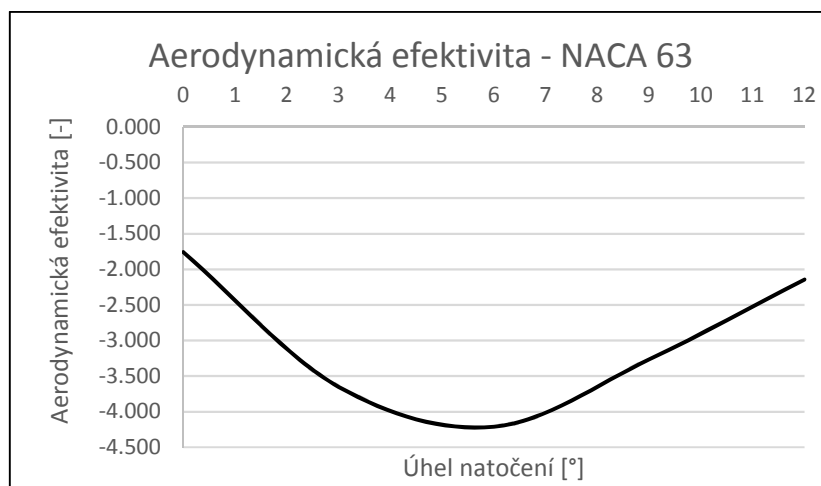


Obr. 36 – Průběh rychlosti profilu NACA63 [Autor]

Numerické výsledky simulace

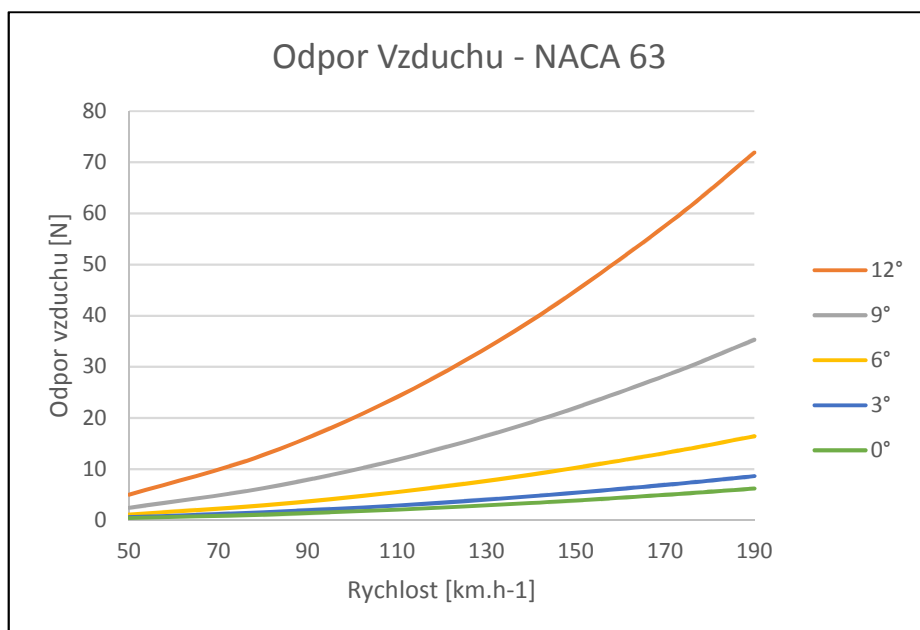
Simulaci jsem prováděl jen v kladném směru natočení, protože v záporném natočení profil generuje vztlak namísto přítlaku, proto je nebylo nutné řešit. Nejlepších hodnot u tohoto profilu je dosahováno při 6 stupních úhlu natočení. Hodnoty v tomto úhlu jsou, 147,64 N přítlaku při odporu jen 4,52 N a aerodynamická efektivita je při tomto úhlu nejlepší. Jednotlivé hodnoty jsou v tabulkách v A Příloze, kde jsou spočteny hodnoty vztlaku a odporu při určité rychlosti.

V grafu 7 vidíme průběh aerodynamické efektivity profilu, jak jsem již zmínil nejlepší hodnoty je dosahováno při 6 stupních natočení.

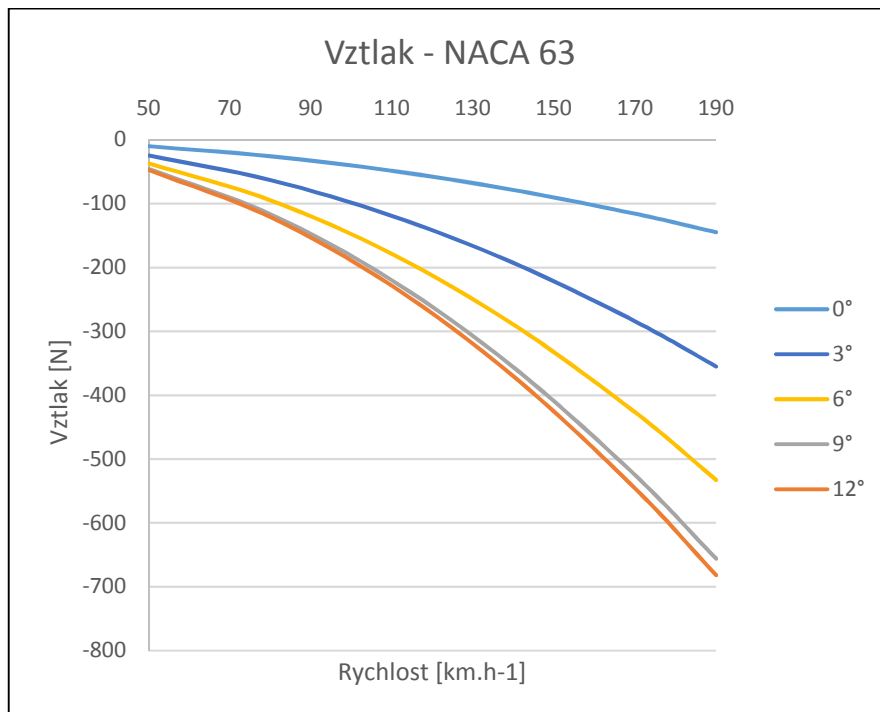


Graf 7 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor]

V následujících grafech 8 a 9 vidíme interpretaci hodnot odporu vzduchu a vztlaku jednotlivých natočení při rostoucí rychlosti. Vidíme zde jak vzrůstá odpor profilu s rostoucím úhlem natočení, v úhlu 12 stupňů má více než trojnásobný odpor vzduchu než při 6 stupních, zato vztlak nevzroste nijak markantně.



Graf 8 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]



Graf 9 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]

4.6.3 Analýza profilu Be 153-055

Druhým analyzovaným profilem byl Be 153-055. Zkontroloval jsem síť, zhodnotil grafické výsledky a výsledky numerického výpočtu.

Kontrola sítě

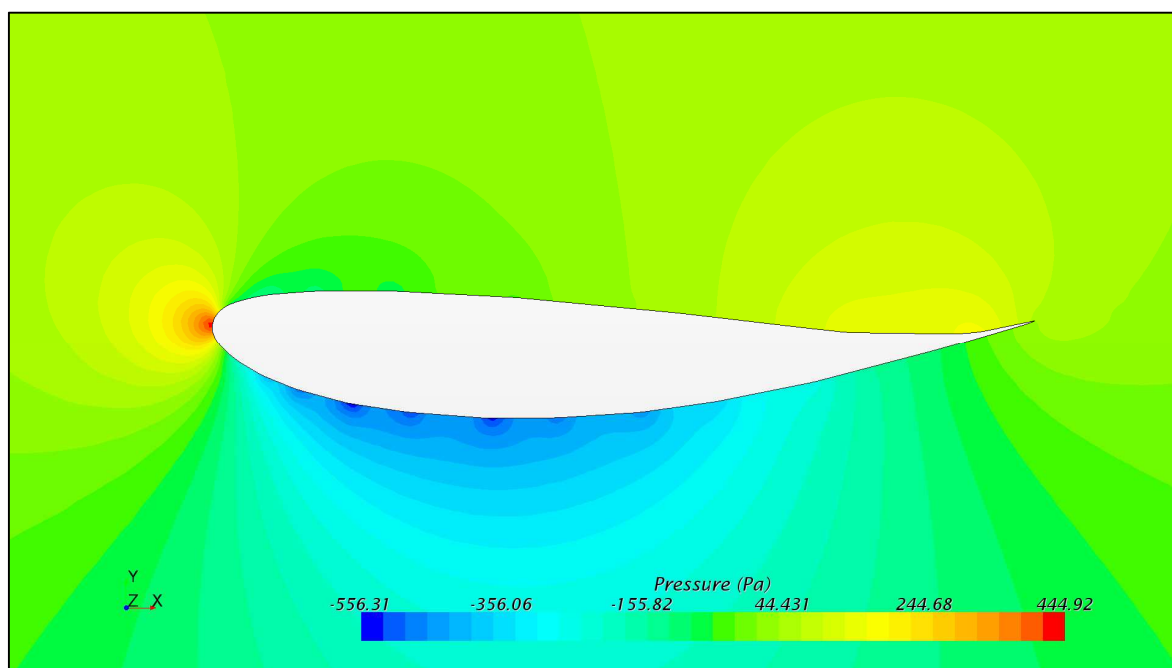
U této kontroly máme tři podmínky:

- Hodnota stěnové funkce (Wall y^+) by měla být v rozmezí 0 až 1
- Výpočetní síť nesmí mít žádný negativní obsah
- Úhel zakřivení (skewness angle) měl by být menší než 85 stupňů

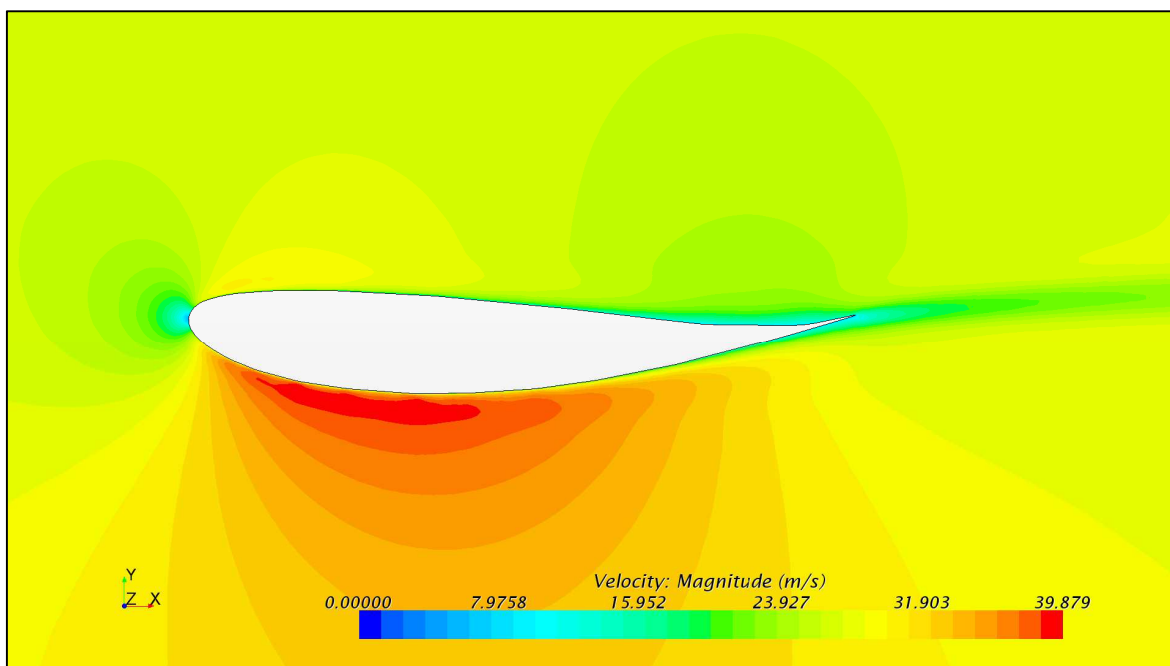
Maximální hodnota stěnové funkce je 0,21. Tato hodnota je menší než 1. Podmínka byla splněna. Následně pomocí diagnostiky jsem zhodnotil zbylé dvě podmínky. Síť nemá žádný negativní objem a hodnota úhlu zakřivení je 57,01 stupňů. Obě dvě podmínky byly splněny. Síť je topologicky validní pro výpočet.

Grafické výsledky simulace

V následujících dvou obrázcích máme grafické zobrazení průběhu rychlosti a tlaku kolem analyzovaného profilu. Na obrázku 37 vidíme, že nad horní hranou vzniká přetlak a pod horní hranou vzniká podtlak. Červená plocha na náběžné hraně zobrazuje stagnační bod. Na dalším obrázku 38 vidíme průběh rychlosti kolem profilu, nad horní hranou profilu máme menší rychlost obtékání než pod horní hranou profilu. Za odtokovou hranou profilu se tvoří viditelně úplav.



Obr. 37 – Průběh tlaku kolem profilu Be 153-055 [Autor]

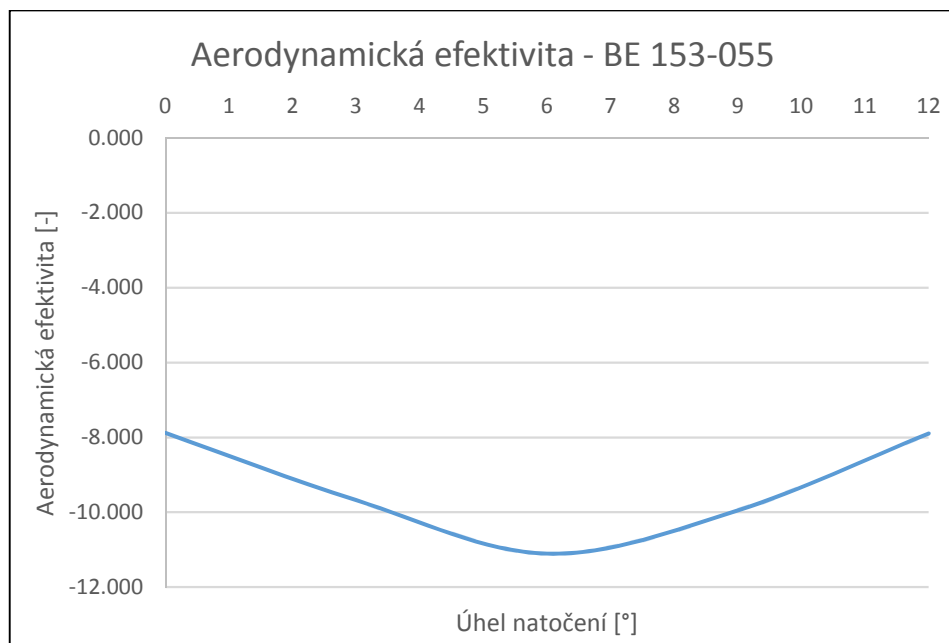


Obr. 38 – Průběh rychlosti kolem profilu Be 153-055 [Autor]

Numerické výsledky simulace

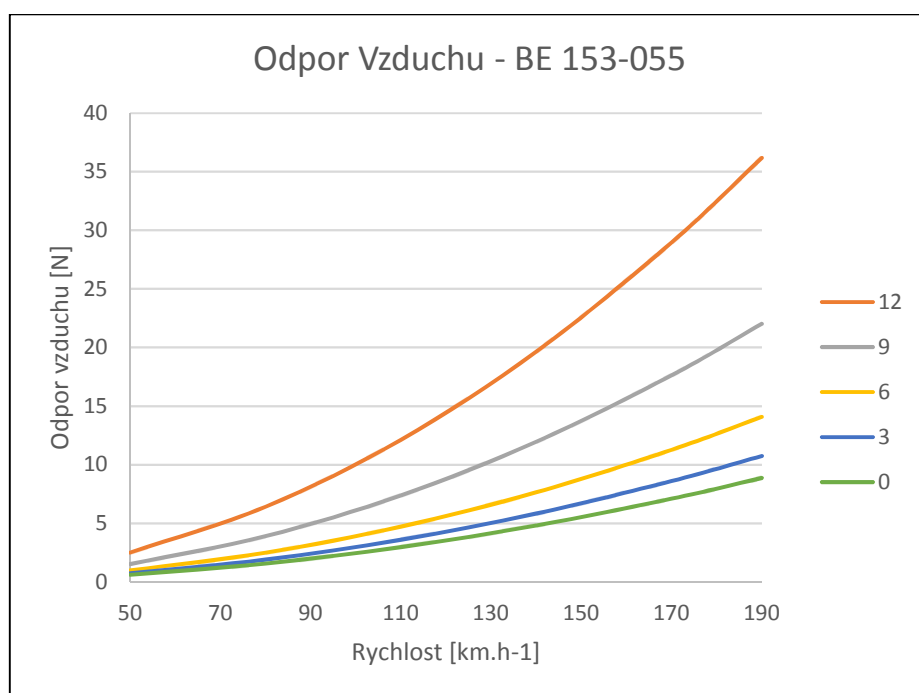
Numerický výpočet byl řešen jen v kladných hodnotách úhlu natočení, protože v záporných hodnotách vznikl vztlak namísto přítlaku. Nejlepší hodnoty nastávají v úhlu natočení 6 stupňů, kde je nejvyšší absolutní hodnota aerodynamické efektivity 11,11. V tomto úhlu je hodnota přítlaku 227,138 N při minimálním odporu 3,901 N.

Průběh aerodynamické efektivity sledujeme v grafu 10, lze vidět vzrůstající hodnotu efektivity spolu s úhlem natočení, kde v 6 stupních dosáhne nejvyšší hodnoty, následně její hodnota opět klesá.

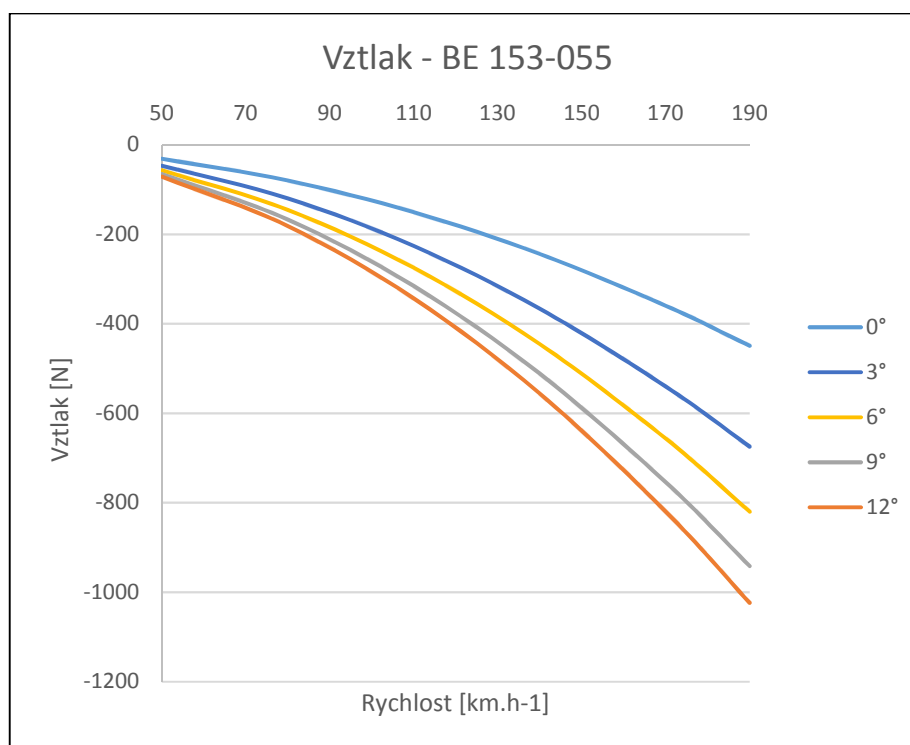


Graf 10 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor]

V grafech 11 a 12 sledujeme průběh vztlaku a odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti. Největšího vztlaku je dosaženo při 12 stupních, ale odpor v tomto úhlu dosahuje více jak dvojnásobných hodnot oproti 6 stupňům.



Graf 11 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]



Graf 12 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]

4.6.4 Analýza profilu Be 122-185

Posledním vybraným profilem pro numerický výpočet byl Be 122-185. Stejně jako u předchozích profilů jsem zkontroloval výpočetní síť a zhodnotil grafické a výsledky numerických výpočtů.

Kontrola sítě

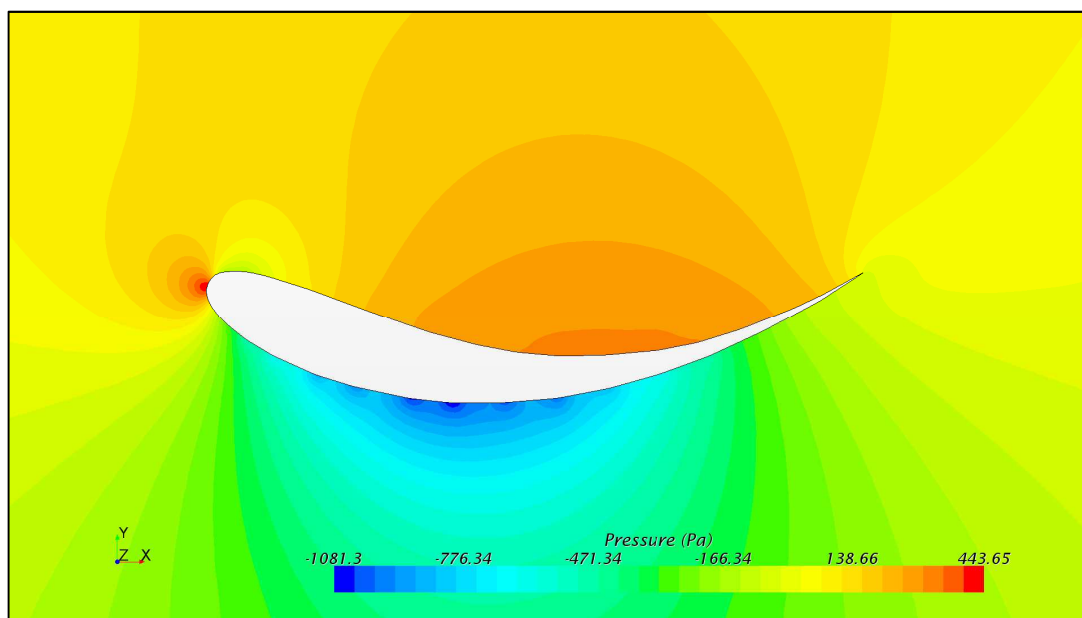
U kontroly sítě máme tři podmínky:

- Hodnota stěnové funkce (Wall y^+) by měla být v rozmezí 0 až 1
- Výpočetní síť nesmí mít žádný negativní obsah
- Úhel zakřivení (Skewness angle) měl by být menší než 85 stupňů

Jak je dáno v podmínce, hodnota stěnové funkce wall y^+ by měla být v rozmezí od 0 do 1. U tohoto modelu hodnota stěnové funkce je 2,67, tím je překročeno dané rozmezí, ale hodnota je menší než 5, takže je stále dostačující. K překročení rozmezí došlo na horní odtokové hraně, ve velmi zanedbatelném měřítku. Zbývající dvě podmínky byly splněny, síť nemá žádný negativní objem a hodnota úhlu zakřivení je 44,58 stupňů. Síť je tímto topologicky validní pro výpočet.

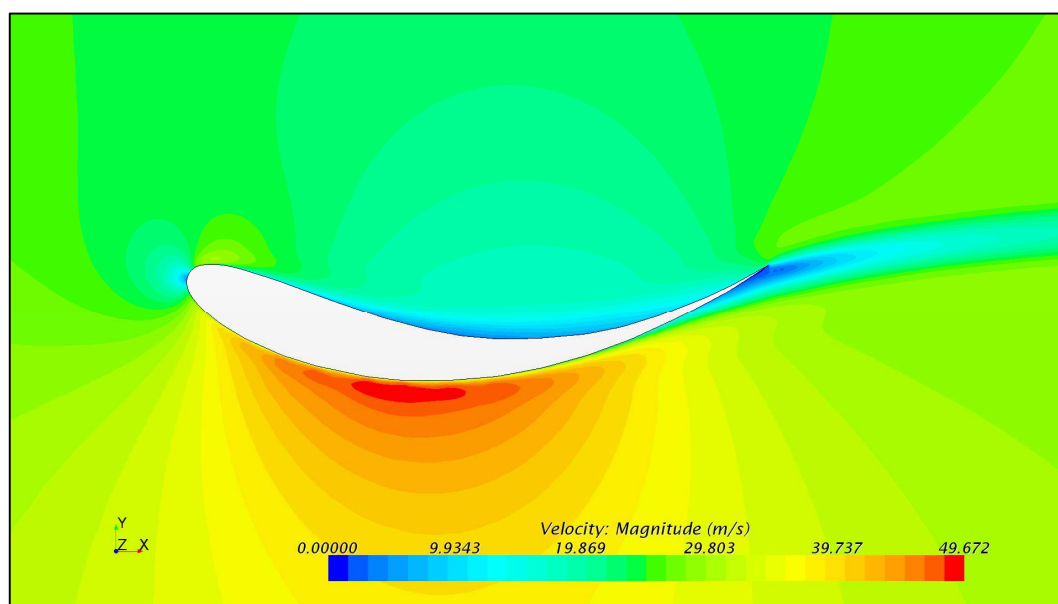
Grafické výsledky simulace

Na následujících dvou obrázcích vidíme průběhy tlaku a rychlosti kolem simulovaného profilu. Pod spodní hranou profilu vidíme modrou plochu, značící podtlak, který dosahuje hodnot až 1081,3 Pa. Nad horní hranou se tvoří přetlak. Tvorba podtlaku a přetlaku je u tohoto profilu výraznější než u ostatních, také dosahuje větších hodnot.



Obr. 39 – Průběh tlaku kolem profilu Be 122-185 [Autor]

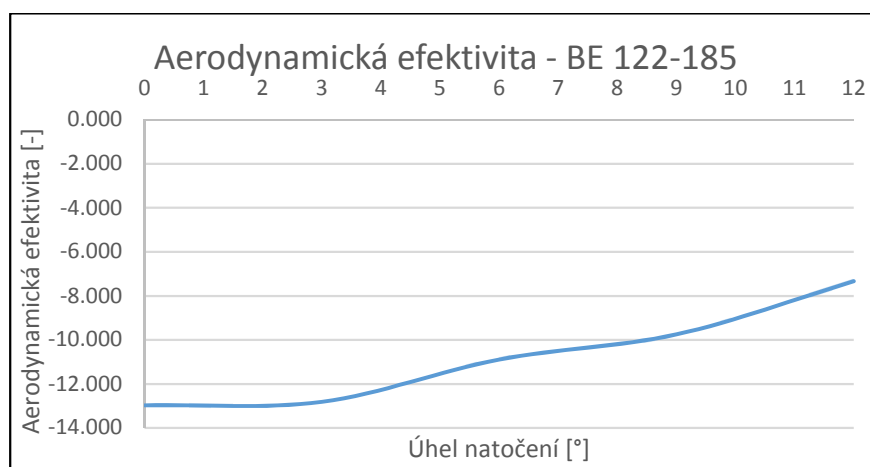
Na obrázku 40 vidíme průběh rychlosti, pod horní hranou máme nejrychlejší proudění, které dosahuje nejvyšších hodnot a nad horní hranou je rychlost proudění téměř nulová. Za profilem sledujeme modrou plochu, značící tvorbu úplavu.



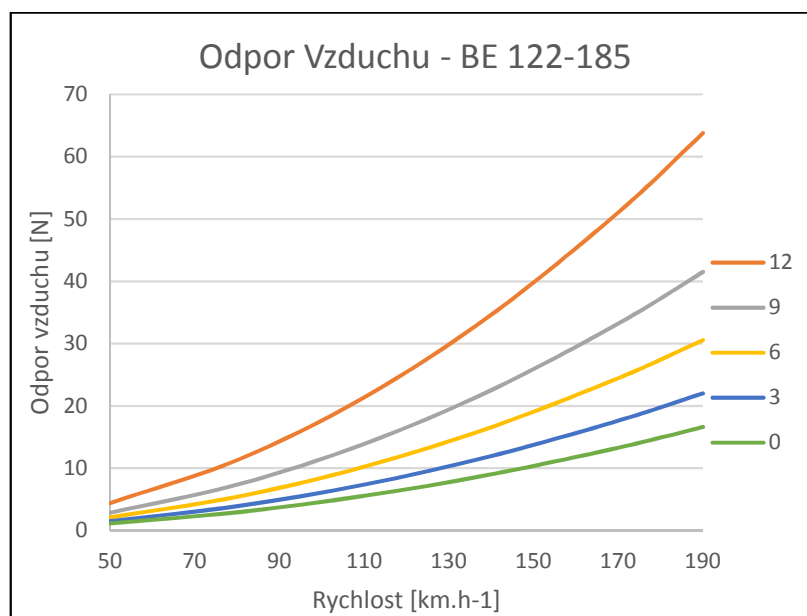
Obr. 40 – Průběh rychlosti kolem profilu Be 122-185 [Autor]

Numerické výsledky simulace

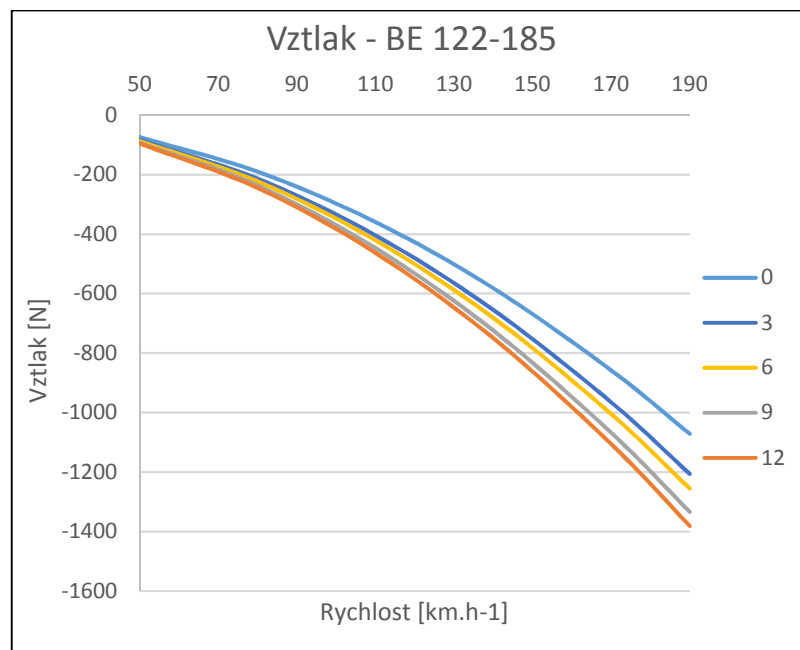
Jako u předešlých simulací, byl opět řešen jen úhel natočení v kladných hodnotách, protože profil v záporných hodnotách generuje vztlak. Nejlepších hodnot dosáhne profil ve 3 stupních. V grafu 13, kde je zobrazen průběh aerodynamické efektivity, vidíme že v tomto místě nemáme největší aerodynamickou efektivitu. Výběr tohoto úhlu závisí na průběhu odporu a vztlaku z grafu 14 a 15, kde jsou interpretovány data z tabulky C Přílohy. Porovnáme-li průběhy 6 stupňů a 3 stupňů naklonění, které mají největší aerodynamickou efektivitu, pozorujeme minimální nárůst vztlaku, za to se o dost zvětší odpor při 6 stupních. Proto byl vybrán úhel natočení 3 stupňů. Hodnoty v tomto úhlu natočení jsou 334,08 N vztlaku a 6,1 N odporu při referenční rychlosti.



Graf 13 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor]



Graf 14 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]



Graf 15 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]

4.6.5 Výběr nejlepšího profilu

Výběr nejlepšího profilu závisí na všech počítaných parametrech. Profil by měl generovat dostatek přítlaku, při co nejmenším odporu. Z každého profilu jsem vybral nejlepší úhly natočení, již zmíněné v předchozích analýzách, při kterých profil dosahoval nejlepších hodnot. Na základě těchto výsledků numerických výpočtů vykazuje nejlepších hodnot profil Be 122-185, tudíž jsem jej vybral jako nový profil křídla, který bude dál simulován společně s vozidlem.

5 Volba vhodného umístění přítláčného křídla na vozidle

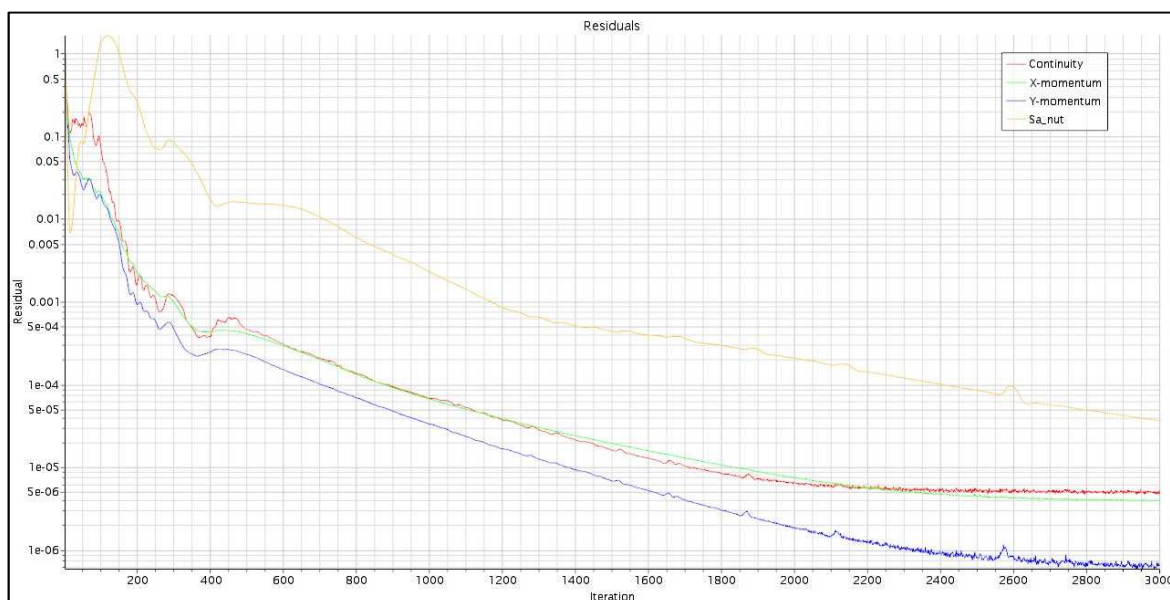
Vybraný profil Be 122-185 byl simulovaný spolu s vozidlem. Výchozí pozicí profilu byl nulový bod. Od tohoto bodu bylo křídlo posunováno v osách x a y. Před výpočtem jsem zkontroloval tři podmínky výpočetní sítě, stejně jako u profilů.

Tři podmínky výpočetní sítě:

- Hodnota stěnové funkce (Wall y+) by měla být v rozmezí 0 až 1
- Výpočetní síť nesmí mít žádný negativní obsah
- Úhel zakřivení (skewness angle) měl by být menší než 85 stupňů

Stěnová funkce nabývá maximální hodnoty 0,1, první podmínka byla splněna. Informace o zbylých dvou podmínkách jsem získal z diagnostiky sítě. Výpočetní síť nemá žádný negativní obsah a hodnota úhlu zakřivení je 58,04 stupňů. Tímto byly splněny i zbylé dvě podmínky. Výpočetní síť je topologicky validní pro výpočet.

Jako první jsem profil simuloval v nulovém bodě, hodnoty tohoto bodu jsou výchozími pro následné porovnání posunu profilu v osách x a y. Simulace proběhla na 3000 iterací, kdy výpočet již zkonvergoval a přesnost výsledků hodnot byla minimálně 10^{-5} . Pro urychlení výpočtu jsem využil výsledků předchozí simulace. Měnil jsem pouze polohu křídla a výsledky předchozí simulace byly použity jako iniciační vstupní hodnoty do dalších výpočtů.



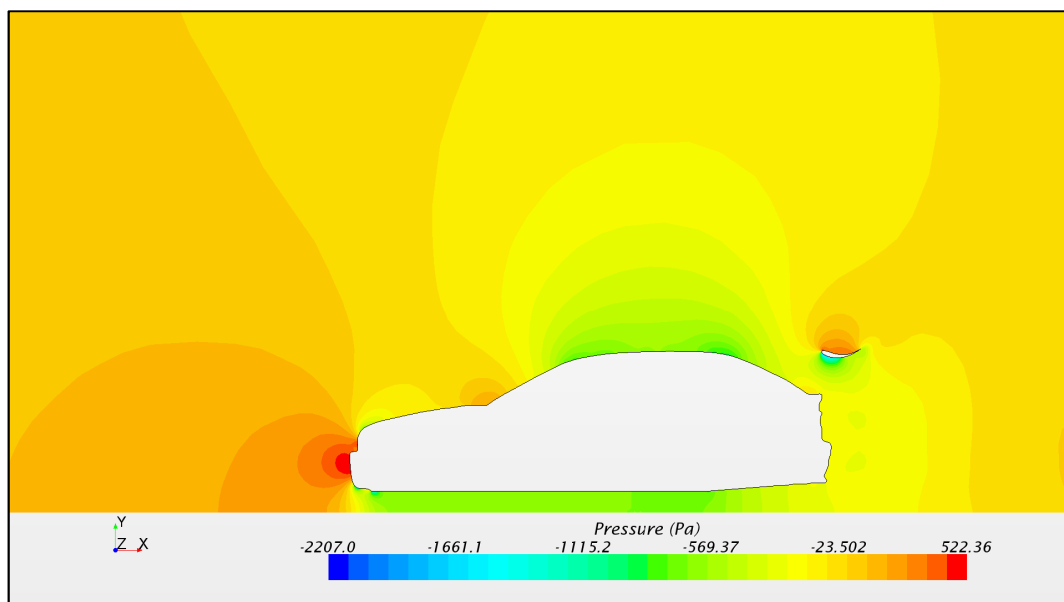
Obr. 41 – Rezidua při 3000 iteracích [Autor]

Nejprve jsem křídlo posunoval ve směru osy x. Začal jsem s hodnotou posunu -10 cm a následně +10 cm. Výsledné hodnoty jsem zpracoval v Excelu, a pozoroval jsem nárůst, či úbytek vztahové a odporové síly. Dále byl posun -15 cm a +15 cm, toto byl poslední posun v ose x, další neměl význam, hodnoty vztahu a odporu při této pozici byly horší než ve výchozí pozici (viz. D Příloha).

Počáteční posun v ose y byl stejný jako u osy x, začínal jsem 10 cm a následně 15 cm v obou směrech osy. Na základě hodnot posunů jsem profil směřoval jen do hodnot záporných. Výsledky v kladném směru byly horší a vztlak velmi rychle klesal (viz. E Příloha). Proto jsem následně posunoval křídlo jen do záporného směru osy y.

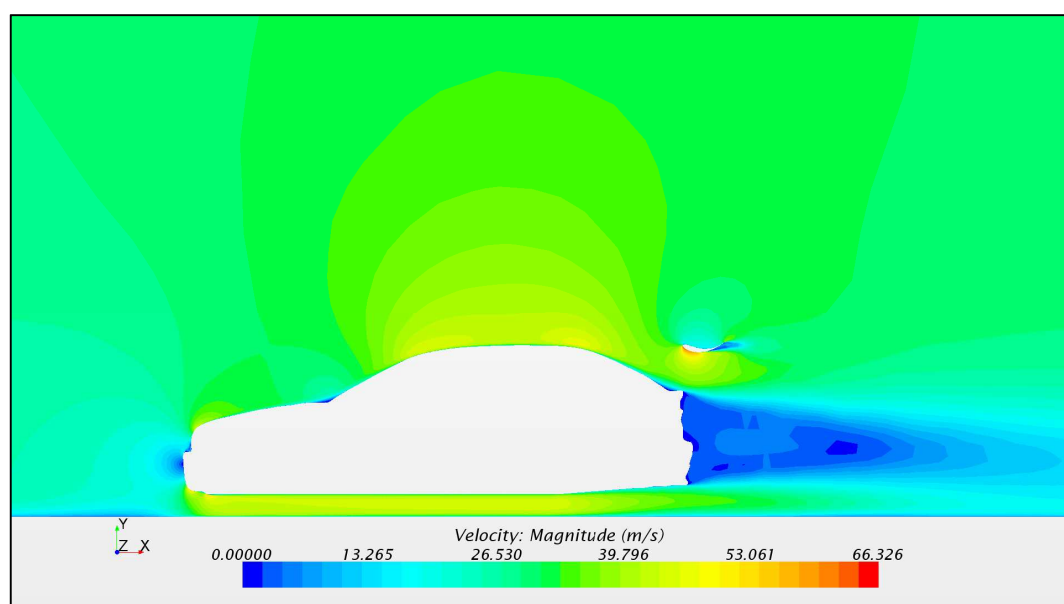
Grafické výsledky simulace

Průběhy tlaku a rychlosti můžeme vidět na následujících dvou obrázcích. Na obrázku 42 vidíme průběh tlaku kolem vozidla a profilu. Na přední části vozidla v oblasti předního nárazníku se vytváří místo s největším tlakem, jedná se o stagnační bod. V oblastech kolem střechy vozidla a pod ním, vzniká prostředí s podtlakem.



Obr. 42 – Průběh tlaku kolem vozidla a křídla v nulovém bodě [Autor]

Na obrázku 43 vidíme rychlostní pole v oblastech kolem vozidla. Ve stagnačním bodě vozidla je rychlost proudění nulová. Kolem střechy a pod vozidlem se proudění zrychluje, za vozidlem vzniká oblast s nízkou rychlostí proudění, kde vzniká úplav.

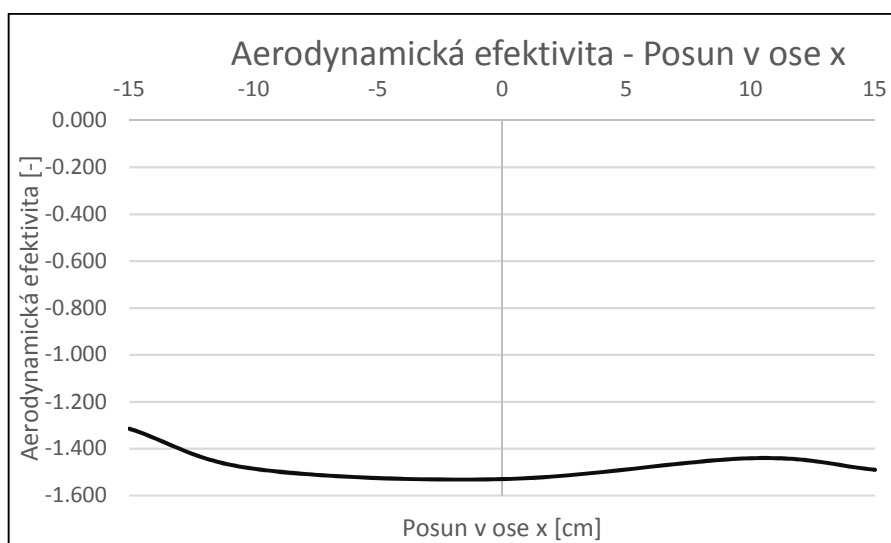


Obr. 43 – Průběh rychlosti kolem vozidla a křídla v nulovém bodě [Autor]

Numerické výsledky simulace

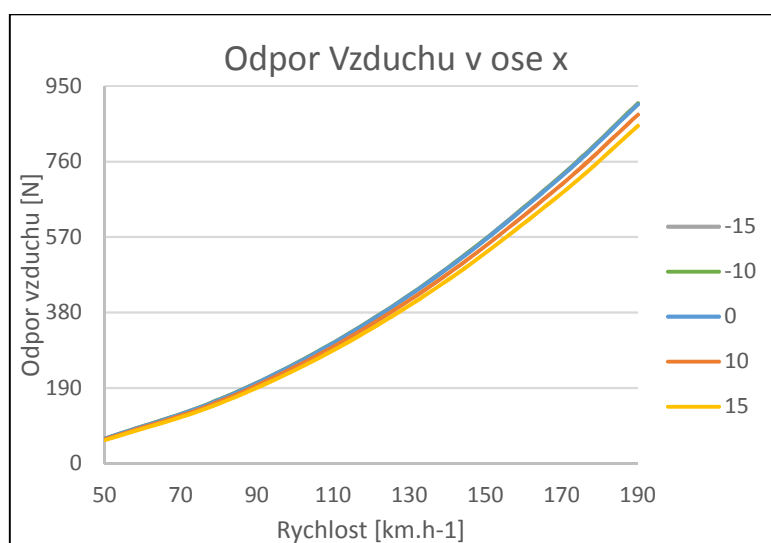
Výsledky numerických výpočtů (viz. D Příloha a E Příloha) jsem zpracoval v podobě grafů. Nejlepší aerodynamické efektivity v ose x je dosahováno v nulovém posunu (graf 16).

Odpovídají tomu i průběhy grafů 17 a 18, kde vidíme jednotlivé odpory a vztlaky při posunech.

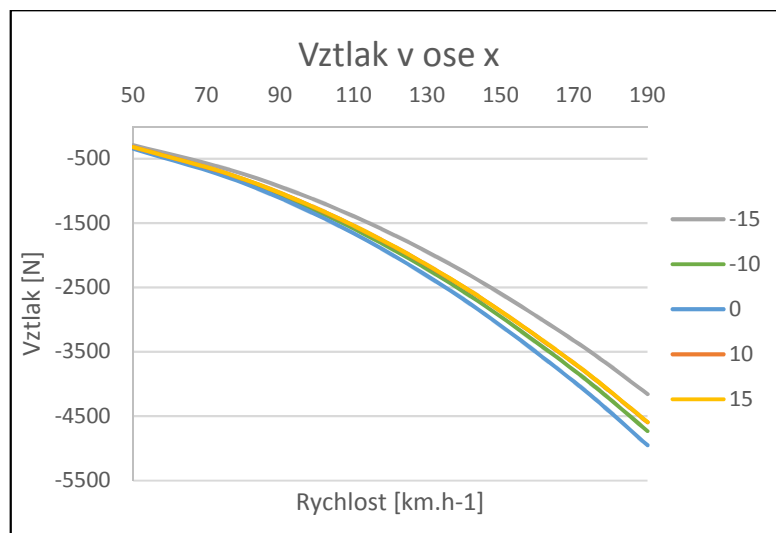


Graf 16 – Aerodynamická efektivita v jednotlivých posunech osy x [Autor]

Odpory vzduchu při posunu -15, -10 a 0 cm jsou totožné, ale z grafu 17 vidíme, že největšího vztlaku je dosaženo v nultém bodu osy x.

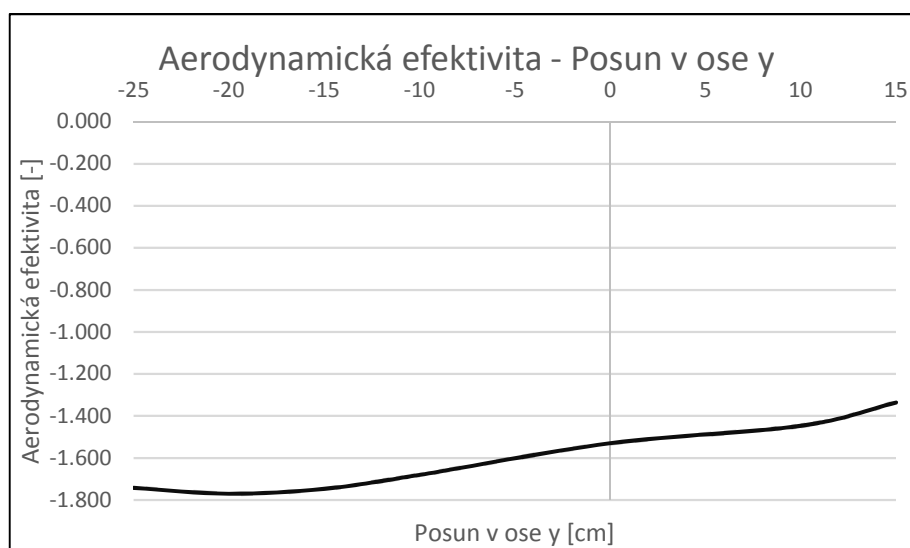


Graf 17 – Průběh odporu v jednotlivých posunech osy x [Autor]



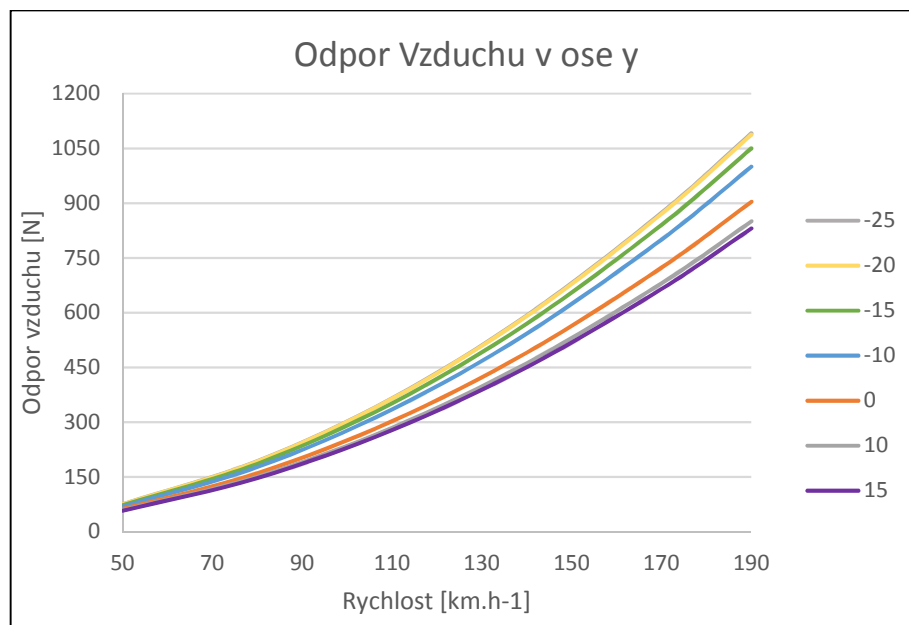
Graf 18 – Průběh vztlaku v jednotlivých posunech osy x [Autor]

Dále posun v ose y. Průběh aerodynamické efektivity při tomto posunu vidíme na grafu 19, kde sledujeme zvětšení aerodynamické efektivity spolu s posunem profilu do záporného směru osy y. Nejlepší hodnoty je dosaženo v posunu -20 cm.

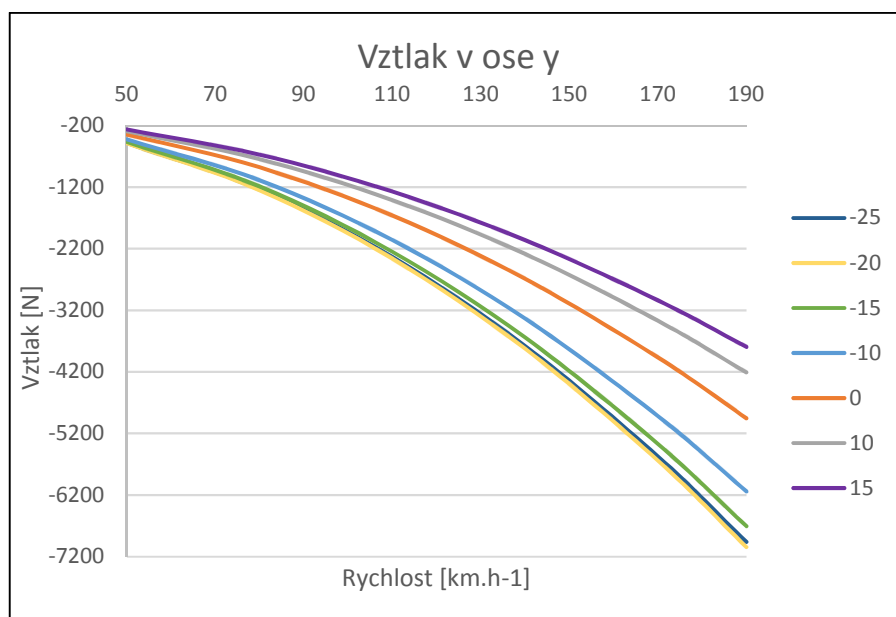


Graf 19 – Aerodynamická efektivity v jednotlivých posunech osy y [Autor]

Odpor v posunu -20 a -25 cm je totožný, liší se v hodnotě 1 N, (viz. E Příloha). I u vztlaku můžeme vidět, že průběh u těchto dvou posunů je téměř shodný, ale u dosahovaných konečných hodnot je rozdíl 100 N, větší hodnota je u posunu -20 cm.



Graf 20 – Průběh odporu v jednotlivých posunech osy y [Autor]

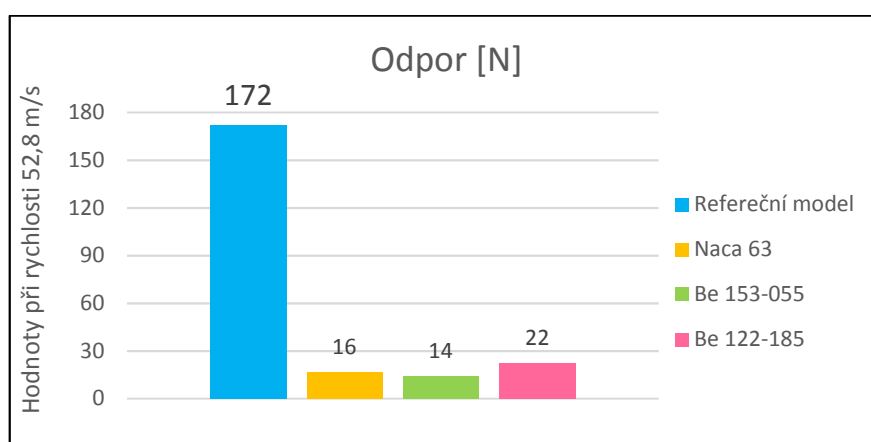


Graf 21 – Průběh odporu v jednotlivých posunech osy y [Autor]

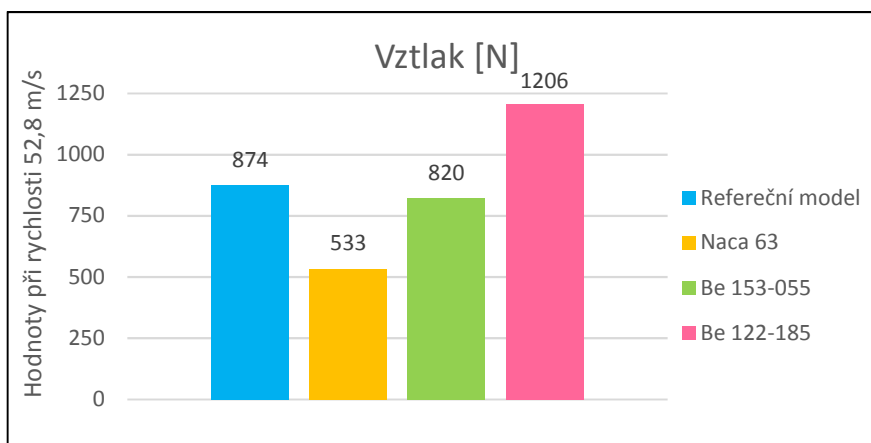
6 Zhodnocení a doporučení

Zhodnocení jednotlivých výsledků jsem prováděl pomocí aplikace Excel. Pro zhodnocení profilů jsem vybraná data, při kterých profily vykazovaly nejlepší hodnoty (viz. jednotlivé analýzy profilů), zpracoval pomocí sloupcových grafů. Ve třech grafech nalezneme hodnoty odporu, vztlaku při rychlosti 52,8 m/s a k tomu příslušnou aerodynamickou efektivitu.

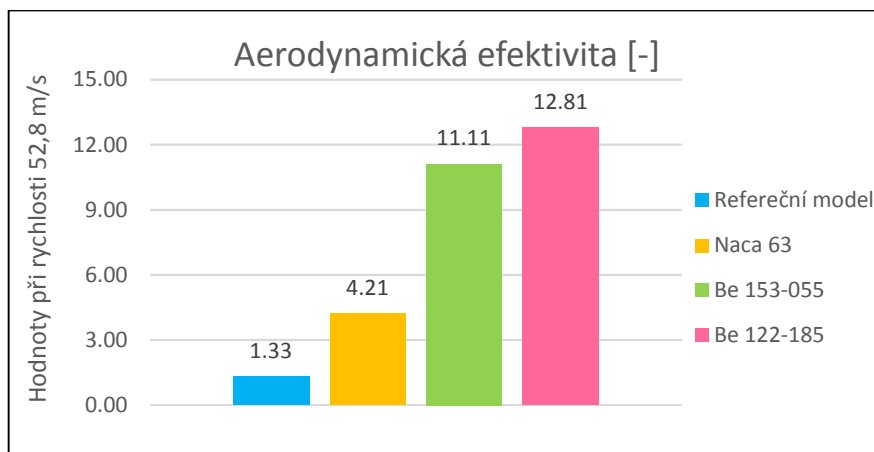
Podle grafů lze vidět, že nejlepších výsledků vykazuje profil Be 122-185. Má největší aerodynamickou efektivitu, přítláčnou sílu a odpor, který není příliš vysoký. Na rozdíl profil Be 153-055 má nižší odpor vzduchu, ale přítláčná síla by výběrem tohoto křídla klesla při rychlosti 52,8 m/s téměř o 400 N.



Graf 22 – Srovnání hodnot odporu profilů [Autor]

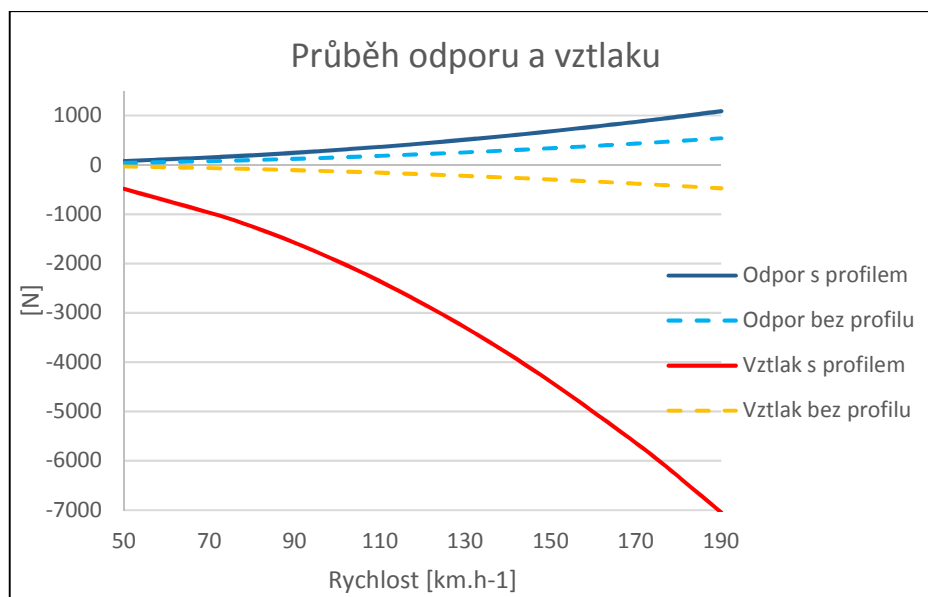


Graf 23 – Srovnání hodnot vztlaku profilů [Autor]



Graf 24 – Srovnání aerodynamických efektivit profilů [Autor]

Ze simulace vyšel nejlépe profil Be 122-185 s úhlem natočení 3 stupně. Tento profil byl následně simulován spolu s vozidlem a byla určena pozice od nulového bodu, kde profil má nejlepší hodnoty. Pozice od nulového bodu je [0;-20] cm. Vozidlo spolu s křídlem v tomto bodě dosahuje při rychlosti 190 km/h hodnot vzlaku -7046 N při odporu 1088 N, tyto hodnoty 2D numerického výpočtu jsou pro jeden metr délky profilu. V grafu 25 vidíme porovnání průběhu odporu a vzlaku vozidla s profilem nebo bez profilu. Vozidlo s profilem dosahuje až čtrnáctinásobný vztlak než vozidlo bez profilu, jenom při dvounásobném zvýšení odporu vozidla.



Graf 25 – Porovnání průběhu odporu a vzlaku vozidla s profilem a bez profilu [Autor]

V oblasti nad profilem se vytváří výrazný přetlak, pod profilem je oblast s podtlakem (viz. F Příloha). V F Příloze jde vidět na rychlostním poli kolem profilu, že je nad profilem rychlost proudění blíží se k nule a pod profilem dosahuje rychlost téměř nejvyšších hodnot.

Rychlost proudění můžeme sledovat i na obrázku v G Příloze, kde je rychlost interpretována pomocí proudnic. Za vozidlem vzniká prázdný prostor, jedná se o úplav.

Pro větší přesnost doporučuji následně udělat simulaci ve 3D, která je sice náročnější, ale výsledek je zato přesnější. Také je možno hledat dále a simulovat další typy profilů pro křídlo.

Pokud bychom na vozidle chtěli dosáhnout větších přitlačných sil z nově vybraného profilu Be 122-185, je možné také křídlo zvětšit, co se týče hloubky profilu. Nynější hloubka je 350 mm, když se zvětší hloubka, vzroste i celková plocha křídla. Takto větší profil by měl z principu generovat větších sil.

Stávající profil na vozidle je vyroben z hliníkového plechu. Bylo by vhodné popřemýšlet nad výrobou nového profilu z kompozitních vláken. Kompozit je mnohem lehčí než hliník, takže by se dokázala snížit celková váha zadního přitlačného křídla. Toto snížení váhy bude působit velmi příznivě, protože na závodních vozidlech se snažíme redukovat váhu, co nejvíce. Křídlo by mohlo být uchyceno pomocí protažených wingletů, které by mohly být vyrobeny z hliníku nebo taktéž z kompozitních vláken. Uchycení by mohlo být také řešeno pomocí trubek o malém průměru, z toho důvodu, aby se tímto řešením nezvětšovaly odporové síly.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo najít vhodné umístění zadního přitlačného křídla závodního automobilu tak, aby byla zajištěna co nejlepší aerodynamická efektivita prvku generující přítlak. Jádrem práce bylo seznámit se s prostředím CFD výpočetního softwaru Star-CCM+, navrhnout metodiku výpočtu, analyzovat stávající zadní přitlačné křídlo pomocí výpočtu a najít místo něj nový a lepší profil křídla na základě rešerše a výpočtu.

V první části práce jsem popsal základní teoretické pojmy, základy proudění a vyhledal jsem nové profily křídel. Dále jsem pokračoval v tvorbě metodiky 2D výpočtu v programu Star-CCM+. Před vytvořením výpočetního modelu, jsem vymodeloval potřebná 3D data, která jsem následně použil ve výpočtech.

V závěrečné části práce jsem již aplikoval metodiku výpočtu a provedl jsem simulaci jednotlivých profilů. Výsledky simulací referenčního křídla a vybraných profilů, jsem mezi sebou porovnal a vybral nejefektivnější z nich. Nově vybraný profil křídla jsem simuloval společně s modelem vozidla. Výstupem práce je nový profil křídla s určenou polohou na vozidle.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. 4th ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c1998. ISBN 07-680-0029-7.
- [2] CYMERYYS, Darek. *Počátky aerodynamiky* [online]. [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.aerotatra.czweb.org/zacatky.htm>
- [3] OSLIZLO, Aleš. *Principy konstrukce aerodynamického tvaru karoserie vozidel* [online]. Brno, 2008 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6761. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Marián Laurinec.
- [4] ŠILAR, Josef. *Aerodynamické parametry nákladních vozidel* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65050. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Hejtmánek.
- [5] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/MT/Mechanika%20tekutin.pdf>. Učební text. VŠB - TUO.
- [6] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 978-0837601427.
- [7] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Janalik-Obtekani.pdf>. Učební text. VŠB - TUO.
- [8] KOVANDA, Bohuslav a Jan KOVANDA. *Aerodynamika vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-1942-X.
- [9] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-707-8912-3.
- [10] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [11] *User guide Star-CCM+*, CD – ADAPCO, STAR CCM+

- [12] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2008 [cit. 2018-05-20]. ISBN 978-80-248-1913-6. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [13] VANČURA, Jan. *Výpočet aerodynamiky závodního automobilu*. Brno, 2008. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5406. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [14] PACOŇ, Lukáš. *Ověření CFD simulací v aerodynamickém tunelu*. Praha, 2016. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65705/F2-BP-2016-Pacon-Lukas-BP_Pacon_3.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [15] ŠIROKÝ, Jaromír. *Pohyb silničních vozidel* [online]. In: . Ostrava [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Moodle/2_4.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1 – Automobil Tropfenwagen [2]	13
Obr. 2 – Mezní vrstva [7].....	16
Obr. 3 – Odtržení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [7]	17
Obr. 4 – Laminární proudnice [6].....	17
Obr. 5 – Turbulentní proudnice [6].....	17
Obr. 6 – Přilnuté a odtržené proudění [6]	18
Obr. 7 – Úplav [7].....	18
Obr. 8 – Rozložení tlaku na povrchu karoserie [7].....	19
Obr. 9 – Projekce čelní plochy [10].....	20
Obr. 10 – Vývoj součinitele c_x [10]	20
Obr. 11 – Osový souřadný systém vozidla a momenty působící v daných osách [8]	21
Obr. 12 – Znázornění obtékání profilu [7].....	25
Obr. 13 – Rozložení tlaků působících na profil křídla spolu se silami [7]	26
Obr. 14 – Geometrie profilu [7].....	27
Obr. 15 – Zadní přítláčné křídlo [Autor]	27
Obr. 16 – Rozměry tunelu [11].....	30
Obr. 17 – Typy sítí [Autor].....	31
Obr. 18 – Strom okrajových podmínek v programu Star-CCM+ [Autor].....	32
Obr. 19 – Strom kontinuí v programu Star-CCM+ [Autor].....	34
Obr. 20 – Metody modelování turbulentního proudění [12]	35
Obr. 21 – Model vozu BMW E36 [Autor].....	36
Obr. 22 – Modely jednotlivých profilů [Autor].....	37
Obr. 23 – Model referenčního křídla [Autor]	37
Obr. 24 – Kontrola kvality modelu [Autor].....	38
Obr. 25 – Detail výpočetní oblasti profilu [Autor]	38
Obr. 26 – Nulový bod pro křídlo [Autor]	39
Obr. 27 – Detail výpočetní oblasti po odečtení simulovaného modelu. [Autor].....	39
Obr. 28 – Okrajové podmínky simulovaného modelu [Autor].....	40
Obr. 29 – Směry natočení profilů [Autor]	42
Obr. 30 – Grafické zobrazení stěnové funkce Wall y^+ [Autor].....	42
Obr. 31 – Výpis z diagnostiky sítě – Kontrola negativního objemu [Autor].....	43
Obr. 32 – Výpis z diagnostiky sítě – Kontrola úhlu zakřivení [Autor]	43

Obr. 33 – Průběh tlaku referenčního křídla při referenční rychlosti [Autor].....	43
Obr. 34 – Průběh rychlosti referenčního křídla při referenční rychlosti [Autor].....	44
Obr. 35 – Průběh tlaku profilu NACA63 [Autor].....	48
Obr. 36 – Průběh rychlosti profilu NACA63 [Autor].....	49
Obr. 37 – Průběh tlaku kolem profilu Be 153-055 [Autor]	51
Obr. 38 – Průběh rychlosti kolem profilu Be 153-055 [Autor]	52
Obr. 39 – Průběh tlaku kolem profilu Be 122-185 [Autor]	55
Obr. 40 – Průběh rychlosti kolem profilu Be 122-185 [Autor]	55
Obr. 41 – Rezidua při 3000 iteracích [Autor]	58
Obr. 42 – Průběh tlaku kolem vozidla a křídla v nulovém bodě [Autor]	59
Obr. 43 – Průběh rychlosti kolem vozidla a křídla v nulovém bodě [Autor]	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Nastavení fyzikálního modelu výpočtu pro křídlo [Autor]	40
Tabulka 2 – Nastavení fyzikálního modelu výpočtu vozidla a křídla [Autor]	41
Tabulka 3 – Výsledky simulace referenčního křídla při referenční rychlosti [Autor].....	45
Tabulka 4 – Hodnoty odporu referenčního křídla v závislosti na rychlosti [Autor].....	46
Tabulka 5 – Hodnoty vztlaku referenčního křídla v závislosti na rychlosti [Autor]	46

Seznam grafů

Graf 1 – Křivka profilu Be 153-055 [Autor]	28
Graf 2 – Křivka profilu NACA63(2)-615 s 50% tloušťkou [Autor]	28
Graf 3 – Křivka profilu Be 122-185 [Autor]	28
Graf 4 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor].....	45
Graf 5 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]	47
Graf 6 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor].....	47
Graf 7 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor].....	49
Graf 8 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]	50
Graf 9 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor].....	50
Graf 10 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor].....	53
Graf 11 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]	53
Graf 12 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor].....	54
Graf 13 – Průběh aerodynamické efektivity v jednotlivých úhlech natočení [Autor].....	56
Graf 14 – Průběhy odporu v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor]	56

Graf 15 – Průběhy vztlaku v závislosti na úhlu natočení a rychlosti [Autor].....	57
Graf 16 – Aerodynamická efektivita v jednotlivých posunech osy x [Autor].....	60
Graf 17 – Průběh odporu v jednotlivých posunech osy x [Autor].....	60
Graf 18 – Průběh vztlaku v jednotlivých posunech osy x [Autor]	61
Graf 19 – Aerodynamická efektivita v jednotlivých posunech osy y [Autor].....	61
Graf 20 – Průběh odporu v jednotlivých posunech osy y [Autor].....	62
Graf 21 – Průběh odporu v jednotlivých posunech osy y [Autor].....	62
Graf 22 – Srovnání hodnot odporu profilů [Autor]	63
Graf 23 – Srovnání hodnot vztlaku profilů [Autor]	63
Graf 24 – Srovnání aerodynamických efektivit profilů [Autor]	64
Graf 25 – Porovnání průběhu odporu a vztlaku vozidla s profilem a bez profilu [Autor] ..	64

Seznam příloh

A Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu NACA 63(2)-615.....	72
B Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu Be 153-055.....	73
D Příloha – Tabulky hodnot simulace vozidla a profilu při posunu v ose x.....	74
C Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu Be 122-185.....	75
E Příloha – Tabulky hodnot simulace vozidla a profilu při posunu v ose y.....	76
F Příloha – Detail tlakového a rychlostního pole za vozidlem.....	77
G Příloha – Proudnicе kolem vozidla s přítlačným křídlem.....	78

A Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu NACA 63(2)-615

Úhel natočení [°]	Vztlak [N]	Odpor [N]	Čelní plocha S_{lift} [m ²]	Čelní plocha S_{drag} [m ²]	C_L	C_D	A_f
12	-188.918	19.918	0.342	0.077	-1.217	0.568	-2.143
9	-181.732	9.780	0.346	0.061	-1.160	0.355	-3.265
6	-147.636	4.552	0.348	0.045	-0.936	0.222	-4.210
3	-98.344	2.391	0.350	0.031	-0.621	0.170	-3.649
0	-40.054	1.717	0.350	0.026	-0.252	0.144	-1.758

Odpor vzduchu [N]							
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8	
12°	4.98	12.7	24.1	39	57.6	71.9	
9°	2.44	6.26	11.8	19.2	28.3	35.3	
6°	1.14	2.91	5.51	8.92	13.2	16.4	
3°	0.6	1.53	2.89	4.69	6.91	8.63	
0°	0.43	1.1	2.08	3.37	4.96	6.2	

Vztlak [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
12°	-47.2	-121	-229	-370	-546	-682
9°	-45.4	-116	-220	-356	-525	-656
6°	-36.9	-94.5	-179	-289	-427	-533
3°	-24.6	-62.9	-119	-193	-284	-355
0°	-10	-25.6	-48.5	-78.5	-116	-145

B Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu Be 153-055

Úhel natočení [°]	Vztlak [N]	Odpor [N]	Čelní plocha S_{lift} [m2]	Čelní plocha S_{drag} [m2]	C_L	C_D	A_f
12	-283.597	10.023	0.341	0.095	-1.833	0.232	-7.895
9	-260.851	6.101	0.344	0.080	-1.672	0.168	-9.947
6	-227.138	3.901	0.343	0.065	-1.461	0.132	-11.106
3	-186.863	2.978	0.349	0.054	-1.183	0.122	-9.679
0	-124.412	2.458	0.349	0.054	-0.786	0.100	-7.881

Odpor vzduchu [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
12°	2.51	6.41	12.1	19.6	29	36.2
9°	1.53	3.9	7.38	12	17.6	22
6°	0.98	2.5	4.72	7.65	11.3	14.1
3°	0.74	1.91	3.6	5.84	8.61	10.8
0°	0.61	1.57	2.97	4.82	7.1	8.87

Vztlak [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
12°	-70.9	-182	-343	-556	-820	-1024
9°	-65.2	-167	-316	-511	-754	-942
6°	-56.8	-145	-275	-445	-656	-820
3°	-46.7	-120	-226	-366	-540	-675
0°	-31.1	-79.6	-151	-244	-360	-449

C Příloha – Tabulky vypočtených hodnot profilu Be 122-185

Úhel natočení [°]	Vztlak [N]	Odpor [N]	Čelní plocha S_{lift} [m ²]	Čelní plocha S_{drag} [m ²]	C_L	C_D	A_f
12	-382.615	17.675	0.338	0.115	-2.498	0.340	-7.337
9	-369.509	11.498	0.343	0.104	-2.379	0.244	-9.747
6	-347.728	8.467	0.345	0.091	-2.226	0.204	-10.889
3	-334.080	6.101	0.349	0.082	-2.113	0.165	-12.810
0	-296.864	4.601	0.348	0.070	-1.882	0.145	-12.975

Odpor vzduchu [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
12°	4.42	11.3	21.4	34.6	51.1	63.8
9°	2.87	7.36	13.9	22.5	33.2	41.5
6°	2.12	5.42	10.2	16.6	24.5	30.6
3°	1.53	3.9	7.38	12	17.6	22
0°	1.15	2.94	5.57	9.02	13.3	16.6

Vztlak [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
12°	-95.7	-245	-463	-750	-1106	-1381
9°	-92.4	-236	-447	-724	-1068	-1334
6°	-86.9	-223	-421	-682	-1005	-1255
3°	-83.5	-214	-404	-655	-965	-1206
0°	-74.2	-190	-359	-582	-858	-1072

D Příloha – Tabulky hodnot simulace vozidla a profilu při posunu v ose x

Poloha v ose x [cm]	Vztlak [N]	Odpor [N]	Čelní plocha S _{lift} [m ²]	Čelní plocha S _{drag} [m ²]	C _L	C _D	A _f
-15	-1151.349	251.328	4.377	1.256	-0.580	0.441	-1.314
-10	-1310.810	250.849	4.427	1.258	-0.653	0.440	-1.485
0	-1372.008	250.353	4.527	1.264	-0.669	0.437	-1.530
10	-1273.334	243.272	4.611	1.269	-0.609	0.423	-1.440
15	-1272.199	235.487	4.612	1.272	-0.609	0.409	-1.490

Odpor vzduchu [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
-15	62.8	161	304	493	726	907
-10	62.7	161	304	492	725	906
0	62.6	160	303	491	724	904
10	60.8	156	294	477	703	878
15	58.9	151	285	462	681	850

Vztlak [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
-15	-288	-737	-1393	-2257	-3327	-4156
-10	-328	-839	-1586	-2569	-3788	-4732
0	-343	-878	-1660	-2689	-3965	-4953
10	-318	-815	-1541	-2496	-3680	-4597
15	-318	-814	-1539	-2494	-3677	-4593

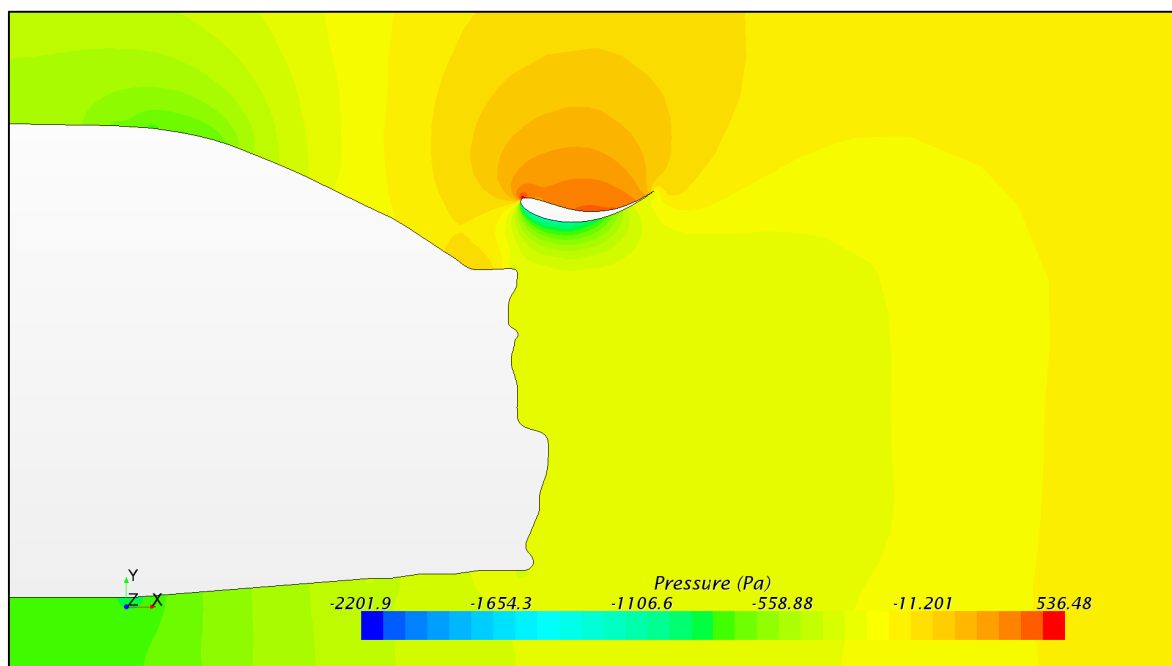
E Příloha – Tabulky hodnot simulace vozidla a profilu při posunu v ose y

Poloha v ose y [cm]	Vztlak [N]	Odpor [N]	Čelní plocha S _{lift} [m2]	Čelní plocha S _{drag} [m2]	C _L	C _D	A _f
-25	-1928.516	302.324	4.540	1.240	-0.937	0.538	-1.742
-20	-1951.670	301.323	4.537	1.240	-0.949	0.536	-1.770
-15	-1857.898	290.890	4.535	1.240	-0.904	0.518	-1.746
-10	-1701.313	276.987	4.532	1.240	-0.828	0.493	-1.680
0	-1372.008	250.353	4.527	1.264	-0.669	0.437	-1.530
10	-1166.029	235.569	4.522	1.322	-0.569	0.393	-1.447
15	-1051.238	230.121	4.519	1.322	-0.513	0.384	-1.336

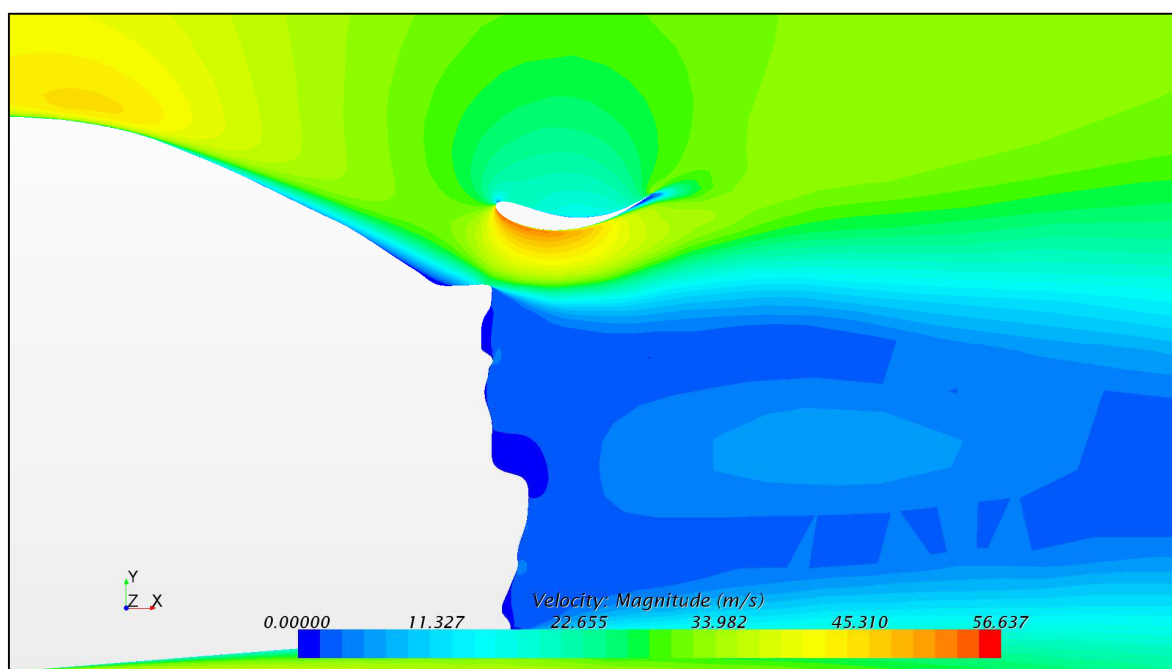
Odpor vzduchu [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
-25	75.6	193	366	593	874	1091
-20	75.3	193	365	591	871	1088
-15	72.7	186	352	570	841	1050
-10	69.2	177	335	543	800	1000
0	62.6	160	303	491	724	904
10	58.9	151	285	462	681	850
15	57.5	147	278	451	665	831

Vztlak [N]						
Rychlost [m/s]	13.9	22.2	30.6	38.9	47.2	52.8
-25	-482	-1234	-2334	-3780	-5573	-6962
-20	-488	-1249	-2362	-3825	-5640	-7046
-15	-464	-1189	-2248	-3641	-5369	-6707
-10	-425	-1089	-2059	-3335	-4917	-6142
0	-343	-878	-1660	-2689	-3965	-4953
10	-292	-746	-1411	-2285	-3370	-4209
15	-263	-673	-1272	-2060	-3038	-3795

F Příloha – Detail tlakového a rychlostního pole za vozidlem



Průběh tlaku



Průběh rychlosti

G Příloha – Proudnice kolem vozidla s přitlačným křídlem

